



Université  
de Toulouse

# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *l'Institut National Polytechnique de Toulouse*  
Discipline ou spécialité : *Systèmes Automatiques*

---

Présentée et soutenue par *Walid HANKACHE*  
Le *16/12/2008*

**Titre :** *Gestion Optimisée de l'Énergie Électrique d'un Groupe Électrogène Hybride à Pile à Combustible*

---

### JURY

*Pr. Alain BOUSCAYROL, L2EP, USTL, Lille, rapporteur*  
*Pr. Rachid OUTBIB, LSIS, Université d'Aix-Marseille, rapporteur*  
*Pr. Thierry-Marie GUERRA, LAMIH, UVHC, Valenciennes, président*  
*M. Georges SALLOUM, Professeur à l'Université Libanaise, examinateur*  
*M. Christophe TURPIN, chargé de recherche CNRS, LAPLACE, examinateur*  
*Pr. Maurice FADEL, LAPLACE, INPT-ENSEEIH, Toulouse, co-directeur de thèse*  
*Pr. Daniel HISSEL, FEMTO-ST, Université de Franche-Comté, co-directeur de thèse*  
*M. Stéphane CAUX, m.d.c., LAPLACE, INPT-ENSEEIH, Toulouse, co-encadreur de thèse*  
*M. Nicolas FOUQUET, Doc. Ingénieur, PSA Peugeot Citroën, invité*

---

**Ecole doctorale :** *Ecole Doctorale Systèmes*  
**Unité de recherche :** *LAPLACE*  
**Directeurs de Thèse :** *Maurice FADEL*  
*Daniel HISSEL*

# Gestion Optimisée de l'Énergie Électrique d'un Groupe Électrogène Hybride à Pile à Combustible

## MÉMOIRE

présenté et soutenu publiquement le 16 décembre 2008

pour l'obtention du

**Doctorat de l'Institut National Polytechnique**

(Spécialité Systèmes Automatiques, Embarqués)

par

Walid Hankache

### Composition du jury

*Rapporteurs :* M. Alain Bouscayrol  
M. Rachid Outbib

*Examineurs :* M. Thierry-Marie Guerra  
M. Maurice Fadel  
M. Daniel Hissel  
M. Stéphane Caux  
M. Christophe Turpin  
M. Georges Salloum

*Invité :* M. Nicolas Fouquet

## Remerciements

Avec ce mémoire qui vient clôturer plus de trois années de recherche, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à l’accomplissement de ce travail, et qui ont marqué, par leur présence, une étape essentielle de ma vie.

Meilleurs salutations aux membres du jury de thèse pour l’honneur qu’ils m’ont fait de participer à l’évaluation de mon travail.

Enorme reconnaissance à mes directeurs de thèse Maurice Fadel et Daniel Hissel pour leurs conseils judicieux, à mon encadreur de thèse Stéphane Caux pour sa disponibilité et sa patience.

Reconnaissants remerciements à mes collègues d’enseignement Bruno Sareni, François Defay, François Pigache, Frédéric Messine, Jérémie Régnier, Jérôme Faucher, Labo Chhun, Marcel Grandpierre et Sylvain Girinon pour la richesse des expériences échangées.

Cordiaux sentiments à tous mes collègues du laboratoire, chercheurs, ingénieurs, techniciens, personnels administratifs et étudiants, en particulier Bernardo Cougo, Bertrand Asse, François Bonnet, Frédéric Richardeau, Laurianne Menard, Makara Khov, Maria David, Marwan Zeidan, Mohamed Esseghir Lalami, Pascale Maussion, Rafael Diez, Samer Rabih, Samuel Bonnard, Sébastien Carrière, Vincent Phlippoteau et Youssef Razouk pour l’ambiance aussi professionnelle que chaleureuse créée au laboratoire.

Infinie gratitude à mes amis Alain, Charbel, Charbel, Daniel, Elias, Elie, Fabien et Christine, Fabienne, Fadi, Fares, Florence et Issam, Georges, Hervé, Hikmat, Ibrahim Moukarzel, Jacques, Joseph, Kamil, Layale, Marie Christine, Mario, Michèle et Emmanuel, Michel, Mohamed, Nadine, Phéломène, Pierre, Rajaa, Rana, Sandy, Toni, Wissam, Youssef, Youssef et Ziad pour être une seconde famille, grande famille.

A mes parents pour leur dévouement, ma soeur et mon frère pour leur encouragement.

A ma femme Adèle pour son amour.

A Celui qui était, qui est et qui vient.



*A ma femme*

*A ma famille*



# Table des matières

Liste des tableaux	xv
Introduction Générale	1
Chapitre 1 Véhicules Hybrides à Pile à Combustible	7
1.1 Introduction	7
1.2 Transport et énergie	7
1.2.1 Préoccupations environnementales	8
1.2.2 Ressources fossiles	9
1.2.3 Défis énergétiques	9
1.2.4 Vecteurs d'énergie	9
1.3 Véhicules hybrides	10
1.3.1 Concept d'une chaîne de traction hybride	10
1.3.2 Architectures du groupe motopropulseur hybride électrique	12
1.3.2.1 Architecture série	12
1.3.2.2 Architecture parallèle	12
1.3.3 Véhicules hybrides à pile à combustible	13
1.4 La Pile à Combustible	13
1.4.1 Aperçu historique	13
1.4.2 Principe de fonctionnement	14
1.4.3 Types de piles à combustible	15
1.4.4 Pile à combustible de type PEM ou PEMFC	16
1.4.5 Système PAC et auxiliaires	17
1.4.5.1 Circuit d'alimentation en hydrogène	17
1.4.5.2 Circuit d'alimentation en air	18
1.4.5.3 Sous-systèmes de gestion d'eau et de température	19
1.5 Etat actuel du marché des véhicules légers à pile à combustible	20
1.6 Le groupe électrogène hybride à pile à combustible	20

1.6.1	Pack de supercondensateurs . . . . .	22
1.6.2	Hacheur survolteur et réversible . . . . .	24
1.6.3	Gestion de l'énergie du groupe électrogène . . . . .	25
1.6.4	Cahier des charges et dimensionnement des éléments du groupe électrogène	26
1.6.4.1	Dimensionnement du stack de pile à combustible . . . . .	26
1.6.4.2	Dimensionnement du pack de supercondensateurs . . . . .	27
1.6.4.3	Dimensionnement des hacheurs . . . . .	30
1.7	Conclusion . . . . .	31

**Chapitre 2 Modélisation des Pertes dans le Groupe Électrogène Hybride à Pile à Combustible** **33**

2.1	Introduction . . . . .	33
2.2	Pertes dans le groupe électrogène à pile à combustible . . . . .	34
2.3	Rendement de la pile à combustible . . . . .	36
2.3.1	Rendement énergétique de la pile à combustible . . . . .	36
2.3.2	Modèle PAC . . . . .	37
2.3.2.1	Caractérisation de la tension . . . . .	38
2.3.2.2	Hypothèses de simplification . . . . .	40
2.3.2.3	Elaboration du modèle . . . . .	41
Anode . . . . .	41	
Cathode . . . . .	41	
2.3.2.4	Identification paramétrique . . . . .	43
2.3.2.5	Validation expérimentale . . . . .	47
2.4	Puissance absorbée par le compresseur d'air . . . . .	50
2.5	Pertes dans le hacheur survolteur . . . . .	51
2.5.1	Expression des pertes énergétiques dans le hacheur . . . . .	53
2.5.1.1	Pertes en conduction . . . . .	54
2.5.1.2	Pertes par commutation . . . . .	55
2.5.1.3	Calcul des courants mis en jeu dans le fonctionnement du hacheur	57
2.6	Résultats de la modélisation du rendement du groupe électrogène . . . . .	59
2.7	Pertes totales dans l'élément de stockage . . . . .	61
2.7.1	Pertes dans les supercondensateurs . . . . .	64
2.7.2	Pertes dans le hacheur réversible . . . . .	64
2.7.3	Limitation du modèle des pertes dans l'élément de stockage . . . . .	65
2.8	Conclusion . . . . .	65



---

## Chapitre 3 Optimisation Globale de la Distribution de Puissance du Groupe Électrogène Hybride 67

3.1	Introduction . . . . .	67
3.2	Formulation du problème d'optimisation . . . . .	68
3.2.1	L'équation dynamique . . . . .	68
3.2.2	Les contraintes . . . . .	69
3.2.3	Le critère . . . . .	70
3.2.4	Les approches d'optimisation adoptées . . . . .	70
3.3	Programmation dynamique . . . . .	71
3.3.1	Principe de la méthode . . . . .	71
3.3.2	Implantation de l'algorithme . . . . .	73
3.3.2.1	Discrétisation de l'espace d'optimisation . . . . .	73
3.3.2.2	Domaine de validité . . . . .	75
3.3.2.3	Algorithme . . . . .	78
3.3.3	Simulation . . . . .	79
3.3.3.1	Profils de mission . . . . .	79
3.3.3.2	Résultats de simulation . . . . .	81
3.3.3.3	Variation du pas de discrétisation du temps $\Delta t$ . . . . .	84
3.3.3.4	Variation du pas de discrétisation de l'état d'énergie $\Delta E$ . . . . .	85
3.4	Commande optimale . . . . .	87
3.4.1	Principe de la méthode . . . . .	87
3.4.2	Implantation de l'algorithme . . . . .	89
3.4.2.1	Cas sans contraintes . . . . .	90
3.4.2.2	Introduction des contraintes sur l'état . . . . .	92
3.5	Conclusion . . . . .	95

## Chapitre 4 Gestion en Ligne de la Distribution de Puissance du Groupe Électrogène Hybride 99

4.1	Introduction . . . . .	99
4.2	Stratégie de gestion en ligne à base de règles . . . . .	101
4.2.1	Principe de la méthode . . . . .	101
4.2.2	Algorithme de commande . . . . .	102
4.2.2.1	Mode « arrêt » . . . . .	102
4.2.2.2	Mode « freinage » . . . . .	103
4.2.2.3	Mode « traction » . . . . .	103
4.2.3	Choix des paramètres de réglage . . . . .	106
4.2.4	Résultats et observations . . . . .	110

4.3	Système de décision à base de règles floues . . . . .	110
4.3.1	Principe de la méthode . . . . .	113
4.3.2	Mise en oeuvre du système flou . . . . .	114
4.3.2.1	Choix des fonctions d'appartenances . . . . .	114
4.3.2.2	Choix des règles d'inférences . . . . .	115
4.3.2.3	Traitement numérique des inférences . . . . .	118
4.3.3	Résultats et observations . . . . .	121
4.4	Optimisation du système d'inférence flou par l'application d'un algorithme génétique	122
4.4.1	Principe de la méthode . . . . .	125
4.4.2	Mise en oeuvre de l'algorithme génétique . . . . .	126
4.4.2.1	Codage de l'individu . . . . .	128
4.4.2.2	Fonction d'évaluation . . . . .	130
4.4.3	Etude comparative des profils de mission en vue d'interpréter les résultats de l'algorithme génétique . . . . .	133
4.4.3.1	Analyse temporelle . . . . .	133
4.4.3.2	Analyse fréquentielle . . . . .	133
4.4.4	Résultat de l'algorithme génétique appliqué sur les deux profils de mission	136
4.5	Conclusion . . . . .	143
<b>Conclusion et Perspectives</b>		<b>145</b>
<b>Annexe A Notions Thermodynamiques</b>		<b>151</b>
A.1	Formulations énergétiques . . . . .	151
A.2	Premier principe de la thermodynamique . . . . .	151
A.3	Enthalpie . . . . .	152
A.4	Entropie . . . . .	152
A.5	Enthalpie libre . . . . .	153
<b>Annexe B Calcul des Puissances PAC et ES Corrigées dans le Cadre de l'Appli- cation de l'Algorithme Génétique</b>		<b>155</b>
<b>Bibliographie</b>		<b>157</b>

# Table des figures

1.1	Schéma illustrant le concept d'un véhicule hybride . . . . .	11
1.2	(a) Architecture Hybride Série ; (b) Architecture Hybride Parallèle ; (c) Architecture Hybride Série - Parallèle ; (c) Architecture Complexe . . . . .	13
1.3	Structure d'un véhicule hybride à pile à combustible . . . . .	14
1.4	Schéma de principe d'une cellule de pile à combustible . . . . .	15
1.5	Système PAC et auxiliaires . . . . .	18
1.6	Cumulatif des nouveaux véhicules PAC légers [But08] . . . . .	20
1.7	(a) Taux de fabrication par région en 2007-08 ; (b) Taux de déploiement par région en 2007-08 ; [But08] . . . . .	21
1.8	Schéma bloc du groupe électrogène hybride à pile à combustible GEPAC . . . . .	21
1.9	(a) Modèle du premier ordre d'un supercondensateur ; (b) Modèle simplifié du supercondensateur . . . . .	23
1.10	Schéma de principe d'un supercondensateur typique à double couche . . . . .	24
1.11	(a) Schéma constitutif d'un hacheur survolteur ; (b) Schéma d'un hacheur survolteur réversible en courant ; . . . . .	25
1.12	Modèle d'un pack de supercondensateurs . . . . .	28
1.13	Formes d'ondes du hacheur survolteur . . . . .	30
2.1	Distribution des puissances et des pertes dans la structure d'hybridation . . . . .	34
2.2	Bilan énergétique du groupe électrogène à pile à combustible . . . . .	35
2.3	Exemple de la courbe expérimentale de polarisation pour la pile de 20 cellules . . . . .	44
2.4	Courbes de tension mesurée et simulée pour une pile de 20 cellules en régime statique . . . . .	48
2.5	Profil de mission pour véhicule en milieu urbain après homothétie . . . . .	48

2.6	Réponse en tension du modèle et réponse expérimentale à une sollicitation en courant observée sur deux intervalles différents du temps de cycle complet. BPF : filtre de bande passante fixe, BPD : bande passante dynamique, TME : tension mesurée expérimentalement . . . . .	49
2.7	courbe du rendement d'un moteur alternatif en fonction de sa puissance utile rapportée à la puissance nominale . . . . .	51
2.8	Bloc de calcul des pertes du hacheur survolteur . . . . .	52
2.9	Schéma électronique d'une cellule de commutation . . . . .	53
2.10	Mise en parallèle de plusieurs IGBT . . . . .	54
2.11	Caractéristiques de tension de sortie de (a) l'IGBT et (b) la diode . . . . .	55
2.12	Phase de commutation (amorçage) idéalisée d'un transistor . . . . .	56
2.13	(a) Energie dissipée lors de l'amorçage de l'IGBT, (b) Energie dissipée lors du blocage, (c) Energie de recouvrement . . . . .	58
2.14	Modèle de calcul du rendement total du groupe électrogène . . . . .	59
2.15	(a) Rendement énergétique théorique de la pile en combustible, (b) Puissance absorbée par le compresseur d'air . . . . .	60
2.16	(a) Pertes de puissances dans le hacheur survolteur pour deux valeurs différentes de fréquence de découpage, (b) Rendement de ce hacheur en fonction de la puissance bus brute. . . . .	61
2.17	Rendement total du groupe électrogène en fonction de la puissance PAC bus . . . . .	61
2.18	Variation du rendement en fonction de la pression partielle d'oxygène : (a) Rendement de la pile à combustible, (b) Rendement de compression d'air, (c) Rendement total du groupe électrogène. . . . .	62
2.19	Bilan énergétique de l'élément de stockage . . . . .	63
2.20	Modèle énergétique d'un groupe électrogène hybride à pile à combustible . . . . .	65
3.1	Maillage de l'espace de l'état d'énergie de l'élément de stockage sur un horizon de temps défini . . . . .	75
3.2	Domaine de validité de l'état d'énergie de l'élément de stockage . . . . .	77
3.3	Schéma illustratif de la démarche de l'algorithme de programmation dynamique . . . . .	80
3.4	Schéma bloc de l'algorithme de programmation dynamique . . . . .	80
3.5	Profil de mission INRETS . . . . .	81

---

3.6	Profil de mission ESKISEHIR . . . . .	81
3.7	Trajectoire optimale de l'état d'énergie de l'élément de stockage pour le profil de mission de l'INRETS pour un $\Delta t = 0, 1s$ et $\Delta E = 1kW.s$ . . . . .	82
3.8	Distribution de puissance optimale pour le profil de mission de l'INRETS pour un $\Delta t = 0, 1s$ et $\Delta E = 1kW.s$ . . . . .	83
3.9	Trajectoire optimale de l'état d'énergie de l'élément de stockage pour le profil de mission ESKISEHIR pour un $\Delta t = 1s$ et $\Delta E = 1kw.s$ . . . . .	83
3.10	Distribution de puissance optimale pour le profil de mission d'ESKISEHIR pour un $\Delta t = 1s$ et $\Delta E = 1kW.s$ . En noir : $P_{PAC\_opt}$ , en bleu : $P_{dem}$ et en rouge : $P_{ES\_opt}$ . . . . .	83
3.11	Distribution de puissance optimale pour le profil de mission de l'INRETS pour un $\Delta t = 0, 1s$ et $\Delta E = 1kW.s$ . En noir : $P_{PAC\_opt}$ , en bleu : $P_{dem}$ et en rouge : $P_{ES\_opt}$ . . . . .	85
3.12	Distribution de puissance optimale pour le profil de mission de l'INRETS pour un $\Delta t = 2s$ et $\Delta E = 1kW.s$ . En bleu : $P_{dem}$ , en rouge : $P_{dem\_echant}$ , en magenta : $P_{ES\_opt}$ et en noir : $P_{PAC\_opt}$ . . . . .	86
3.13	Trajectoire optimale de l'état d'énergie de l'élément de stockage pour le profil de mission ESKISEHIR pour $\Delta E = 1kW.s$ et $\Delta E = 5kW.s$ ( $\Delta t = 1s$ ). En bleu : $\Delta E = 1kW.s$ , en rouge pointillé : $\Delta E = 5kW.s$ . . . . .	87
3.14	Distribution de puissance optimale pour le profil de mission ESKISEHIR pour $\Delta E = 1kW.s$ et $\Delta E = 5kW.s$ ( $\Delta t = 1s$ ). En bleu (pointillé) : $P_{ES\_opt}$ pour $\Delta E = 1kW.s$ , en magenta : $P_{ES\_opt}$ pour $\Delta E = 5kW.s$ , en rouge (pointillé) : $P_{PAC\_opt}$ pour $\Delta E = 1kW.s$ , et en noir : $P_{PAC\_opt}$ pour $\Delta E = 5kW.s$ . . . . .	88
3.15	Bornes inférieure et supérieure de la puissance absorbée $P_S(t)$ pour le profil de mission ESKISEHIR pour $\Delta t = 1s$ . En bleu : $P_{S\_min}(t)$ et en rouge : $P_{S\_max}(t)$ . . . . .	88
3.16	(a) Courbes de $gamma(P_{PAC})$ ; (b) Courbes de $P_S(P_{ES})$ . . . . .	92
3.17	Distribution optimale de puissances dans le cas de la commande optimale sans contraintes le long des profils (a) INRETS; (b) ESKISEHIR. En bleu : $P_{PAC\_opt}$ , en rouge : $P_{ES\_opt}$ . . . . .	93
3.18	Évolution de l'état d'énergie de l'élément de stockage le long du profil de mission : (a) INRETS; (b) ESKISEHIR. . . . .	93

3.19	Distrbution optimale de puissances dans le cas de la commande optimale avec contraintes le long des profils (a) INRETS ; (b) ESKISEHIR . . . . .	96
3.20	Évolution de l'état d'énergie de l'élément de stockage le long du profil de mission : (a) INRETS ; (b) ESKISEHIR. . . . .	96
4.1	Classification des différentes stratégies de gestion d'énergie dans un véhicule hybride	100
4.2	Limites supérieures et inférieures imposées sur l'état de charge et la puissance de la pile à combustible . . . . .	102
4.3	Algorithme de commande en ligne, définition des modes . . . . .	102
4.4	Algorithme de commande en ligne, mode freinage . . . . .	103
4.5	Algorithme de commande en ligne, mode traction . . . . .	104
4.6	Algorithme de commande en ligne, mode traction (suite) . . . . .	105
4.7	Algorithme de commande en ligne, mode traction (suite) . . . . .	105
4.8	Valeurs de $P_{PAC}$ optimales obtenues avec l'algorithme de programmation dynamique marquées sur la courbe de rendement de la pile pour les deux profils de mission étudiés : (a) INRETS ; (b) ESKISEHIR . . . . .	107
4.9	Résultats de l'algorithme en ligne pour $P_{PAC\_inf} = 6kW$ appliqué au profil INRETS (a) Evolution de l'état de charge de l'élément de stockage ; (b) Erreur entre la puissance demandée et la puissance réellement fournie . . . . .	107
4.10	Résultats de l'algorithme en ligne pour $P_{PAC\_inf} = 9kW$ appliqué au profil ESKISEHIR (a) Evolution de l'état de charge de l'élément de stockage ; (b) Erreur entre la puissance demandée et la puissance réellement fournie . . . . .	108
4.11	Résultats de l'algorithme en ligne pour $P_{PAC\_inf} = 22kW$ appliqué au profil INRETS (a) Evolution de l'état de charge de l'élément de stockage ; (b) Erreur entre la puissance demandée et la puissance réellement fournie . . . . .	108
4.12	Résultats de l'algorithme en ligne pour $P_{PAC\_inf} = 22kW$ appliqué au profil ESKISEHIR (a) Evolution de l'état de charge de l'élément de stockage ; (b) Erreur entre la puissance demandée et la puissance réellement fournie . . . . .	109
4.13	Profil de puissance $P_{PAC}$ généré par l'algorithme de commande en ligne . . . . .	111
4.14	Configuration interne du système de décision à base de logique floue . . . . .	113
4.15	Univers de discours et fonctions d'appartenance de la variable d'entrée, $E$ . . . . .	115

---

4.16 Degrés d'appartenance aux ensembles flous d'une valeur donnée de la variable d'entrée, $E$ . . . . .	116
4.17 Univers de discours et fonctions d'appartenance de la variable d'entrée, $P_{dem}$ . .	116
4.18 Univers de discours et fonctions d'appartenance de la variable de sortie, $P_{PAC}$ . .	116
4.19 Méthode d'inférence max-min pour deux variables d'entrée et deux règles . . . .	119
4.20 Méthode de défuzzification par calcul de l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante . . . . .	120
4.21 Surface caractéristique du système d'inférence évalué sur l'univers de discours des variables d'entrée et de sortie . . . . .	120
4.22 Profil de puissance $P_{PAC}$ générée par l'algorithme flou et puissance $P_{ES}$ correspondante dans le cas du profil de mission INRETS . . . . .	122
4.23 Profil de puissance $P_{PAC}$ générée par l'algorithme flou et puissance $P_{ES}$ correspondante dans le cas du profil de mission ESKISEHIR . . . . .	123
4.24 Evolution de l'état d'énergie de l'élément de stockage donné par l'algorithme flou dans le cas des profils de mission (a) INRETS ; (b) ESKISEHIR . . . . .	123
4.25 Principe général des algorithmes génétiques . . . . .	126
4.26 Organigramme de fonctionnement de l'algorithme génétique . . . . .	127
4.27 Paramètres caractéristiques des fonctions d'appartenance des variables : (a) $P_{dem}$ ; (b) $E$ ; (c) $P_{PAC}$ . . . . .	129
4.28 Paramètres à optimiser considérés comme gènes pour former un chromosome ou un individu . . . . .	130
4.29 Principe de la méthode d'optimisation du système flou . . . . .	132
4.30 Analyse temporelle des profils de mission (a) INRETS ; (b) ESKISEHIR . . . .	134
4.31 Histogramme représentant la distribution des puissances en pourcentage d'occurrence dans le cas du profil (a) INRETS ; (b) ESKISEHIR . . . . .	135
4.32 Spectre d'amplitude de la puissance demandée pour les deux profils de mission INRETS et ESKISEHIR . . . . .	136
4.33 Autocorrelation de la puissance demandée dans le cas du profil (a) INRETS ; (b) ESKISEHIR . . . . .	136
4.34 Fonctions d'appartenance du système flou optimisées sur chacun des profils (a), (c) et (e) : INRETS ; (b), (d) et (f) : ESKISEHIR . . . . .	138

4.35	Surface caractéristique du système flou obtenue par optimisation effectuée sur les profils : (a) INRETS; (b) ESKISEHIR . . . . .	139
4.36	Distribution optimale des puissances obtenue avec l’algorithme génétique pour les profils de mission (a) INRETS; (b) ESKISEHIR . . . . .	139
4.37	Évaluation de l’état de charge sur le système (a) Inr-Inr; (b) Esk-Inr; (c) Esk-Esk; (d) Inr-Esk . . . . .	141
4.38	Comparaison des surfaces caractéristiques du système flou obtenues par optimisation sur les deux profils de mission . . . . .	142



# Liste des tableaux

1.1	Différents types de piles à combustible . . . . .	16
1.2	Comparaison entre les technologies de stockage conventionnelles . . . . .	22
1.3	Caractéristiques du supercondensateur BCAP2000 P270 . . . . .	29
1.4	Caractéristiques du pack de supercondensateurs . . . . .	29
1.5	Caractéristiques des convertisseurs de puissance . . . . .	31
2.1	Liste de grandeurs mesurées lors des expérimentations . . . . .	45
2.2	Liste des paramètres identifiés du modèle de tension de la pile . . . . .	46
2.3	Caractéristiques de l'IGBT utilisé dans le calcul des pertes par commutation . . . . .	55
2.4	Coefficients des polynômes des expressions de $E_{on}$ , $E_{off}$ et $E_{rec}$ . . . . .	57
3.1	Valeurs des limites en puissances et énergies adoptées dans cette étude . . . . .	69
3.2	Energie d'hydrogène consommée sur les deux profils de mission étudiés . . . . .	84
3.3	Résultats de l'algorithme de P.D. pour deux valeurs différentes de $\Delta t$ , 0,1 et 2 s . . . . .	85
3.4	Résultats de l'algorithme de P.D. pour deux valeurs différentes de $\Delta E$ , 1 et 5 kW.s . . . . .	87
3.5	Coefficients des polynômes résultats de l'estimation de $\gamma(P_{PAC})$ et $P_S(P_{ES})$ . . . . .	91
3.6	Energie d'hydrogène consommée sur les deux profils de mission étudiés . . . . .	92
3.7	Les valeurs de $\tau$ et $\lambda(0)$ identifiées sur les profils INRETS et ESKISEHIR . . . . .	95
3.8	Amélioration en consommation apportée par l'algorithme de commande optimale avec (C.O.A.C.) et sans (C.O.S.C.) contraintes . . . . .	95
4.1	Consommation d'hydrogène et erreur de puissance obtenues avec l'algorithme de commande en ligne . . . . .	109
4.2	Matrice d'inférence du système de décision flou . . . . .	118
4.3	Consommation d'hydrogène obtenue par application de l'algorithme flou . . . . .	121

4.4	Opérateurs standards de l'algorithme génétique utilisés dans notre étude . . . . .	128
4.5	Paramètres de réglage des fonctions de l'algorithme génétique . . . . .	128
4.6	Statistiques relatives aux deux profils de mission utilisés, INRETS et ESKISEHIR	133
4.7	Rapports entre puissances maximales et puissances moyennes pour les profils INRETS et ESKISEHIR . . . . .	134
4.8	Consommation obtenue et erreur quadratique moyenne relevée avec l'optimisation par algorithme génétique du système flou . . . . .	140
4.9	Comparaison des résultats obtenus avec les différentes méthodes d'optimisation adoptées . . . . .	143

# Introduction Générale

*« Agis de façon que les effets de tes actions soient compatibles avec la permanence d'une vie authentiquement humaine sur terre et de façon que les effets de ton action ne soient pas destructeurs pour la possibilité future d'une telle vie. Si tel n'est pas le cas, il convient alors de renoncer à l'action projetée » ...*

Par cette phrase rédigée sous forme de profession de foi, le philosophe Allemand Hans Jonas (1903 - 1993) définit la responsabilité dans son oeuvre célèbre « Le Principe Responsabilité » [Jon79]. Refusant d'être accusé comme étant hostile à la technique et son progrès, il a même vu une nécessité de faire progresser la technique afin de pouvoir trouver des remèdes aux dégâts déjà causés par elle.

Partant de cette réflexion philosophique sur le principe de la responsabilité et son application dans le cadre d'une éthique technologique , nous rejoignons la commission mondiale sur l'environnement et le développement dans le Rapport Brundtland dans sa définition proposée en 1987 pour le « développement durable » (ou développement soutenable), à savoir : « Un développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ».

L'entrée dans le 21 ème siècle est marquée par le développement d'une conscience collective autour de la notion de développement durable suscitée par une caractéristique même de l'humanité qui n'est autre que son aptitude à l'adaptation face aux situations nouvelles. Les préoccupations environnementales comme la pollution et le réchauffement climatique ainsi que l'épuisement des ressources fossiles et le besoin croissant en énergie sont derrière une quête acharnée de nouvelles sources d'énergie. Les énergies renouvelables, dans leur diversité, sont au

centre des préoccupations des scientifiques qui cherchent à les développer et à les maîtriser.

Le domaine du transport dans ses branches terrestre, maritime et aérien est au coeur de cette recherche. L'industrie tout autour a constitué l'épine dorsale du développement technologique et économique de la société moderne. Le pétrole, source principale d'énergie, constitue aussi un vecteur d'énergie par excellence, capable d'être transporté pour être transformé en d'autres formes d'énergies utiles. Les vecteurs d'énergies susceptibles de remplacer le pétrole dans les véhicules sont évidemment l'électricité mais aussi l'hydrogène qui fait son entrée en tant que vecteur propre d'énergie en étroite relation de réciprocité et de complémentarité avec l'électricité.

Dans cette perspective, l'utilisation des véhicules électriques est jusque là limitée par les contraintes au niveau des éléments de stockage électrique imposés par le coût, la durée de vie et la capacité énergétique de ces derniers limitant l'autonomie de ces véhicules. Les véhicules hybrides dans lesquels une source secondaire d'énergie électrique vient soutenir le moteur à combustion interne sont une alternative prometteuse à court terme favorisant la limitation en consommation de combustible et constituant une étape intermédiaire vers un « tout électrique ». Dans cette thématique, s'intègrent les véhicules hybrides à pile à combustible qui combinent d'une part une pile à combustible pour la production embarquée d'électricité et d'autre part un élément de stockage de l'énergie électrique. Ces véhicules possèdent les bénéfices des voitures électriques concernant notamment une zéro émission et une indépendance totale du pétrole d'une part et d'autre part l'avantage d'un véhicule conventionnel à savoir une autonomie meilleure et une possibilité de ravitaillement rapide avec l'utilisation de l'hydrogène stocké dans des réservoirs sous pression ou produit à bord.

Si les véhicules hybrides sont mondialement commercialisés, les véhicules à pile à combustible restent au niveau prototypes bien que la plupart des grands constructeurs automobiles soient impliqués dans une phase de recherche et de développement dessus. Une des situations idéales visées serait la production de l'hydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau moyennant les énergies renouvelables tel l'énergie solaire, éolienne, hydraulique ou géothermique, son stockage et sa distribution dans des stations venant remplacer les stations à essence existants partout. Cette idée de rêve peut toutefois être atteinte une fois les nombreux défis technologiques et éco-

---

nomiques liées au coût de fabrication des piles et aux problèmes de stockage et de distribution d'hydrogène sont relevés aussi bien que d'autres obstacles politico-sociaux sont surmontés.

Les recherches autant dans l'industrie qu'au niveau académique s'acharnent . Au niveau industriel, différents modèles sont fabriqués dans les écuries des grands constructeurs automobiles tel Honda, Général Motors, Toyota, etc. Des programmes audacieux au niveau européen sont mis en place tel le programme CUTE à partir de 2003 devenu le programme « Hydrogène pour les transports » faisant circuler des bus fonctionnant à pile à combustible dans de nombreuses capitales européennes. Au niveau académique, plusieurs recherches sont effectuées allant de la compréhension du coeur de la pile à combustible jusqu'à son intégration dans un système de génération électrique. Au niveau national, nous pouvons citer plusieurs projets de recherche. A titre d'exemple, le réseau « Piles à Combustible » (appelé aussi réseau PACo) a été créé en juin 1999 pour favoriser le couplage sur ces technologies entre la recherche publique et les entreprises afin d'assurer la réussite de leur industrialisation. La plate-forme nationale pile à combustible de Belfort est un outil, unique en France et en Europe, dédié aux essais de piles à combustible et de leurs interfaces pour les transports terrestres. Le CEA porte à Grenoble le projet « Paclab », centre d'excellence européen sur les piles à combustible pour le transport propre etc. Au niveau du laboratoire Laplace dans lequel cette étude est menée, la pile à combustible constitue une filière de recherche émergente concernant notamment la modélisation, le dimensionnement et la commande d'un système de pile en collaboration avec des industriels tel Airbus, Hélium ou Alstom.

C'est dans ce contexte général de véhicules hybrides à pile à combustible que se tient cette étude financée par une allocation de recherche du gouvernement français et menée au sein du Laboratoire Plasma et Conversion d'énergie (LAPLACE) de Toulouse en collaboration avec L'institut FEMTO-ST (Franche-Comté Électronique Mécanique Thermique et Optique - Sciences et Technologies), de Belfort. Plus précisément, c'est au niveau de l'utilisation du groupe électrogène hybride à pile à combustible responsable de la fourniture de l'électricité nécessaire au moteur électrique responsable de la traction que nous travaillons. Cette étude vient compléter un travail antécédent au sein du groupe de recherche (CODIASE) [Lac04] dans lequel les éléments constitutifs de la chaîne de traction pour une application Tramway sont caractérisés et contrôlés par l'application de lois de commande appropriées servant à satisfaire les consignes de puissances

demandées tout en contrôlant les points de fonctionnement de la pile notamment les pressions, les débits et la température. Nous nous intéressons en particulier dans notre travail à la gestion de l'énergie électrique dans ce groupe électrogène par la distribution optimale de la puissance demandée entre la pile à combustible d'une part et l'élément de stockage d'autre part. L'objectif global visé est la satisfaction de la puissance demandée sur un profil de mission donné en minimisant la consommation d'hydrogène tout en étant capable de stocker et d'utiliser la puissance récupérée par freinage régénératif. Nous considérons par là que les éléments constitutifs de la chaîne de traction sont pré-dimensionnées sachant que des études de dimensionnement optimal sont parallèlement menées au sein du laboratoire [Arr07].

Afin de poser l'étude sur un cas le plus représentatif d'un cas réel de véhicules légers, un cahier des charges a été fixé servant à convenablement caractériser les éléments du groupe électrogène utilisé. A ce propos une architecture de base, formée d'une pile à combustible associée à un pack de supercapacités moyennant deux convertisseurs statiques, est adoptée. Ces convertisseurs assurent le maintien d'une tension constante sur le bus continu d'une part et imposent, d'autre part, la puissance fournie par l'élément de stockage et donc par la pile à combustible.

Dans la première partie de ce mémoire, nous présentons un état de l'art des véhicules hybrides à pile à combustible. Nous posons ainsi l'étude dans son contexte général en décrivant brièvement les différents éléments mis en jeu. La problématique de la gestion de l'énergie est ainsi présentée et l'architecture de base de la chaîne de traction adoptée est décrite.

Dans un second chapitre, une modélisation orientée rendement des éléments constitutifs de la chaîne de traction est conduite. L'idée générale est de définir un bilan énergétique de la chaîne de traction permettant de partir des puissances utiles au niveau du bus continu ou du noeud de puissance pour remonter jusqu'à l'énergie d'hydrogène consommée d'une part et l'énergie électrique stockée dans l'élément de stockage d'autre part. Ce bilan est rendu possible en caractérisant les pertes d'énergies dans la pile et ses auxiliaires, dans l'élément de stockage et les convertisseurs statiques. Une attention particulière est cependant accordée à la pile à combustible qui constitue l'élément clé de notre étude.

Dans le troisième chapitre, le problème de gestion d'énergie dans le groupe électrogène est

---

formulé en tant que problème d'optimisation dynamique globale « sous contraintes » avec une fonction coût additive en fonction du temps. La dynamique du système étant décrite sous forme d'une équation dynamique discrétisée, nous allons appliquer la méthode de programmation dynamique avec un algorithme récursif basé sur le principe d'optimalité de Bellman. Cette méthode nécessite la connaissance a priori du profil de puissance demandée sur un parcours défini et se classe donc parmi les méthodes d'optimisation hors ligne. Elle va nous servir à déterminer, entre autres, l'efficacité des algorithmes de contrôle en ligne implantés dans le véhicule. Cette méthode est ensuite comparée avec un algorithme basé sur la théorie de la commande optimale classique dans laquelle nous minimisons le Hamiltonien après avoir approché le critère coût par une fonction polynomiale afin de pouvoir calculer analytiquement les dérivées correspondantes.

Le chapitre suivant traite la gestion en ligne de la distribution de puissance du groupe électrogène hybride où aucune connaissance préalable du parcours suivi n'est prise en compte. A ce propos, un algorithme basique faisant appel à des règles logiques fixes est appliqué en premier lieu. Les limitations de cet algorithme nous ont poussés ensuite à l'améliorer par passage aux règles floues. Un système de décision flou qui calcule, à chaque instant, la consigne de puissance de la pile à combustible en fonction de la puissance totale demandée et de l'état de charge de l'élément de stockage est ainsi proposé. Les fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de de sortie du système flou sont enfin optimisées à l'aide d'un algorithme génétique.

Il faut préciser enfin que deux profils de mission issus des parcours réels d'un véhicule en milieu urbain et d'un tramway sont utilisés tout le long de cette étude afin d'évaluer et de comparer les compétences de chaque algorithme. A chaque fois que possible, des comparaisons de consommation sont faites afin de justifier l'apport de la stratégie de stockage de l'énergie et l'optimisation apportée par la supervision de la répartition de puissance sur les éléments.





# Véhicules Hybrides à Pile à Combustible

## 1.1 Introduction

Au cours de ce premier chapitre, nous allons placer l'étude dans son contexte général tout en décrivant brièvement les différents éléments mis en jeu au cours de cette étude. Partant du principe même du développement durable, nous abordons le domaine du transport avec un bref état de l'art des véhicules hybrides conventionnels. Nous introduisons ensuite les véhicules à pile à combustible en tant que véhicules hybrides de configuration série dans lesquels une pile à combustible vient remplacer l'ensemble moteur thermique et générateur électrique. Le principe de fonctionnement de la pile est décrit ici, partant du coeur de pile, en passant par le système pile et ses auxiliaires, jusqu'au groupe électrogène combinant le système pile et un élément de stockage. La problématique traitée dans cette étude, qui n'est autre que la gestion optimale de l'énergie électrique dans ce groupe électrogène, est ensuite introduite. Un dimensionnement convenable sans être optimal des différents éléments de la chaîne de traction est enfin défini afin de constituer une étude homogène calée autant que possible sur la réalité.

## 1.2 Transport et énergie

Le développement des véhicules à moteur à combustion interne est qualifié parmi les meilleures réalisations de la technologie moderne. L'industrie automobile et les autres industries associées constituent l'épine dorsale de l'activité économique mondiale. Cependant, la forte utilisation de

ces automobiles est d'un impact non négligeable sur l'environnement et la vie humaine en général. La pollution, le réchauffement de la planète et l'épuisement des ressources fossiles deviennent des préoccupations mondiales pour les années à venir. Dans les dernières décennies, les activités de recherche et de développement dans le secteur du transport se sont intensifiées dans le but de remplacer, dans le futur proche, les véhicules conventionnels par des véhicules plus efficaces et « propres ». Les véhicules électriques, hybrides électriques et hybrides à pile à combustible sont au coeur de cette recherche.

### 1.2.1 Préoccupations environnementales

Le réchauffement climatique est un phénomène d'augmentation de la température moyenne des océans et de l'atmosphère, à l'échelle mondiale et sur plusieurs années. Dans son acception commune, ce terme est appliqué au changement climatique observé depuis environ vingt-cinq ans. La plupart des scientifiques attribuent à ce réchauffement global une origine en grande partie humaine. Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), affirme dans son dernier et quatrième rapport en 2007, auquel ont participé plus de 2 500 scientifiques de 130 pays différents [GIE07], que la probabilité que le réchauffement climatique soit d'origine humaine est de plus de 90 %. Le réchauffement climatique résulte d'une augmentation continue de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère tels que le dioxyde de carbone et le méthane qui piègent le rayonnement infrarouge émis par la Terre. Sachant que cet effet de serre permet à l'atmosphère de se maintenir à une température moyenne de 15°C, c'est cet effet de serre additionnel induit par les activités humaines qui est responsable du réchauffement climatique. En effet, le dioxyde de carbone est produit en très grande quantité lors de la combustion des hydrocarbures qui constituent l'essentiel des carburants utilisés dans les centrales thermiques, pour les transports routiers, aériens et maritimes. A noter que cette thèse est néanmoins encore contestée par une minorité de scientifiques pour qui, les variations du rayonnement solaire ont beaucoup plus d'influence sur la variation du climat terrestre que les rejets de ( $CO_2$ ) par l'homme [Dur07].

En outre, la combustion des hydrocarbures dans un moteur à combustion interne n'est jamais idéale. Elle est généralement accompagnée par l'émission, outre le ( $CO_2$ ) et l'eau, de gaz plus ou moins toxiques tel que le monoxyde de carbone ( $CO$ ), les oxydes d'azote ( $NO_x$ ) et les hydrocarbures non brûlés ( $HC$ ). Ces gaz ont un effet nuisible direct sur l'environnement et la santé humaine, contribuant à la formation de smog (mélange de brouillard et de fumée), des

pluies acides [FK01], et d'ozone ou à un empoisonnement direct dans le cas du monoxyde de carbone [CSH05] .

### 1.2.2 Ressources fossiles

Le pétrole forme la majorité des combustibles utilisés dans le transport. Il constitue avec les autres ressources fossiles ( gaz naturel et charbon) 86% de la production d'énergie primaire mondiale (base 2005) selon l'EIA [EIA07], l'énergie hydroélectrique ne constituant que 6,3%, le nucléaire 6% et les autres énergies renouvelables (géothermique, solaire, éolienne, biomasse) 0,9%. D'autre part, les réserves de combustibles fossiles de la planète sont fixes et, au rythme actuel de la consommation, leur épuisement doit être envisagé. Fixer une date pour l'épuisement du pétrole reste controversé et dépend de la découverte de nouvelles réserves ou ce qu'on appelle les réserves non prouvées par opposition aux réserves prouvées qui par définition, selon les informations géologiques et techniques disponibles, ont une forte probabilité d'être récupérées dans le futur, à partir de gisements connus et dans les conditions technico-économiques existantes. Cependant, certaines estimations, comme l'USGS, prédisent que les réserves de pétrole deviendront économiquement inexploitable dans les années 2050.

### 1.2.3 Défis énergétiques

Considérant cet épuisement inéluctable des réserves d'énergie fossile ainsi que les préoccupations environnementales déjà évoquées, l'humanité va donc être confrontée, d'ici le milieu de ce siècle, à un gigantesque défi technique, économique et social : remplacer les énergies fossiles par des sources et des formes d'énergie renouvelables, économiquement viables et socialement acceptées. Si aucune des énergies renouvelables existantes n'est capable à elle seule de combler le vide causé par l'épuisement des réserves fossiles, c'est l'ensemble de ces sources d'énergie combinées avec une utilisation plus répandue mais contrôlée du nucléaire qui pourront assurer le besoin en énergie surtout électrique. En perspective, la fusion nucléaire contrôlée et l'énergie solaire spatiale fourniront, une fois les défis technologiques relevés, l'énergie pour plusieurs décennies.

### 1.2.4 Vecteurs d'énergie

Le lien entre la production de l'énergie et son utilisation dans le transport est assuré à l'aide de vecteurs d'énergie tel que l'électricité et l'hydrogène. Dans cette perspective, l'hydrogène s'impose de plus en plus dans les recherches récentes comme vecteur d'énergie possible de l'avenir. Si

l'hydrogène n'existe pratiquement pas dans la nature à l'état pur, il reste l'élément le plus abondant de la nature. Il nécessite son extraction à partir d'autres matières tel que les hydrocarbures et bien entendu l'eau. Ces deux vecteurs d'énergie sont complémentaires de part leur utilisation et leur production vu que l'hydrogène est produit à partir de l'électrolyse de l'eau. Vice versa, l'électricité est produite à partir de l'hydrogène moyennant les piles à combustible sujet de notre étude. Un découplage est ainsi créé entre la production centralisée de l'électricité et son utilisation dans le transport résolvant le problème de stockage en grande quantité de l'électricité.

Si l'utilisation des piles à combustible dans le transport est une perspective prometteuse à long terme en attendant de relever en premier lieu les défis technologiques liés à la production, le stockage et le transport de l'hydrogène, il est impératif à court terme d'améliorer l'économie en combustibles en général favorisant ainsi la commercialisation des véhicules hybrides de tout genre.

### 1.3 Véhicules hybrides

Une automobile hybride est un véhicule faisant appel à plusieurs sources d'énergie distinctes pour se mouvoir. Le concept d'un véhicule hybride électrique remonte aux débuts de l'histoire de l'automobile sauf que le but principal n'était pas de réduire la consommation de combustible mais plutôt d'aider le moteur à combustion interne, à cette époque à faible performance, à assurer un niveau acceptable de compétences [EGGE05]. A ce propos, si les premiers véhicules hybrides étaient montrés au salon de Paris en 1899 [Wak98], ce n'est qu'à la fin du 20ème siècle, précisément en 1997, que la commercialisation des premières voitures hybrides a commencé avec la Toyota Prius et la Honda Insight.

#### 1.3.1 Concept d'une chaîne de traction hybride

Une chaîne de traction hybride est généralement formée de deux sources d'énergie associées à des convertisseurs d'énergie correspondants, comme montré sur la figure 1.1. Une de ces sources, source 2 dans la figure, considérée comme bidirectionnelle, sert d'une part à fournir l'énergie nécessaire et d'autre part à absorber et stocker une partie de l'énergie pour une utilisation ultérieure. Cette structure hybride offre plusieurs chemins de flux de puissance permettant ainsi différentes stratégies de commande. Ainsi les différents scénarios de cheminement de puissance

sont décrits comme suit : [EGGE05]

1. La source 1 fournit la puissance nécessaire à la charge (chemin 1 sur la figure).
2. La source 2 fournit la puissance nécessaire à la charge (chemin 2 sur la figure).
3. Les deux sources 1 et 2 fournissent la puissance en même temps (chemins 1 et 2).
4. La source 2 absorbe la puissance à partir de la charge (chemin 4).
5. La source 2 absorbe la puissance à partir de la source 1 (chemin 3).
6. La source 2 reçoit la puissance à partir de la charge et de la source 1 simultanément (chemins 3 et 4).
7. La source 1 délivre la puissance à la charge et à la source 2 en même temps (chemins 1 et 3).
8. La source 1 délivre la puissance à la source 2 et la source 2 délivre la puissance à la charge (chemins 2 et 3).
9. La source 1 fournit la puissance à la charge et la charge délivre la puissance à la source 2 (chemins 1 et 4).

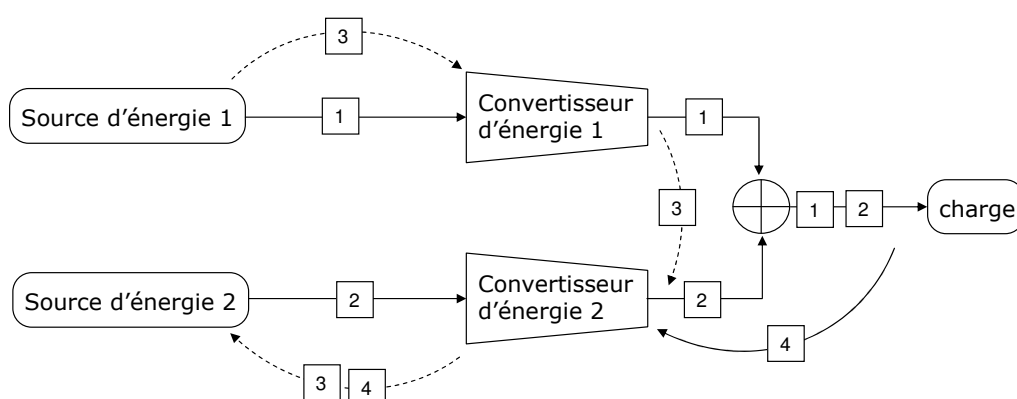


FIG. 1.1 – Schéma illustrant le concept d'un véhicule hybride

Cela dit, dans un véhicule hybride conventionnel, une première source est le réservoir de combustible associé à un convertisseur d'énergie qui est dans ce cas un moteur à combustion interne alors que la deuxième est un accumulateur électrique combiné à un moteur électrique [GEM05]. Ce couplage de sources va permettre la minimisation de consommation tout en assurant une bonne performance du véhicule et une diminution de la taille du moteur à combustion interne.

Cela est assuré en faisant fonctionner les éléments près de leurs points de rendements maximaux avec une stratégie de commande adéquate et grâce au freinage régénératif. Ce dernier n'est autre que l'utilisation de l'énergie cinétique produite par la rotation des roues transformée en électricité par le fonctionnement en générateur du moteur électrique, ce qui permet simultanément de recharger l'élément de stockage et de freiner le véhicule.

### 1.3.2 Architectures du groupe motopropulseur hybride électrique

Le concept de cette chaîne de traction hybride peut être implanté par différentes architectures ou configurations. On note traditionnellement l'existence de deux types d'hybridations, à savoir les architectures série et parallèle. La différence entre ces deux configurations est principalement le noeud liant les sources d'énergie. Sauf que, de nos jours, de nouveaux véhicules hybrides possèdent une configuration plus ou moins complexe donnant lieu à de nouveaux types d'hybridation notamment une hybridation série - parallèle ou une hybridation complexe comme montré dans la figure 1.2 [CC01].

#### 1.3.2.1 Architecture série

Dans une architecture série 1.2(a), le noeud reliant les deux sources d'énergie est un noeud électrique. La source de puissance unidirectionnelle fréquemment adoptée est le réservoir de carburant, le convertisseur d'énergie correspondant étant dans ce cas un moteur à combustion interne couplé à un générateur électrique. La tension à la sortie du générateur étant triphasée, le passage par un redresseur avant sa connexion au bus continu est nécessaire. D'autre part, la source bidirectionnelle est un élément de stockage électrique, généralement un accumulateur ou plus récemment un pack de supercondensateurs ou même une combinaison des deux. Cet élément de stockage est aussi relié au bus continu moyennant un convertisseur statique de puissance continu/continu.

#### 1.3.2.2 Architecture parallèle

Dans une architecture hybride parallèle 1.2(b), le moteur à combustion interne fournit l'énergie mécanique directement aux roues du véhicule. Ce moteur est assisté par un moteur électrique moyennant un couplage mécanique au niveau de la transmission.

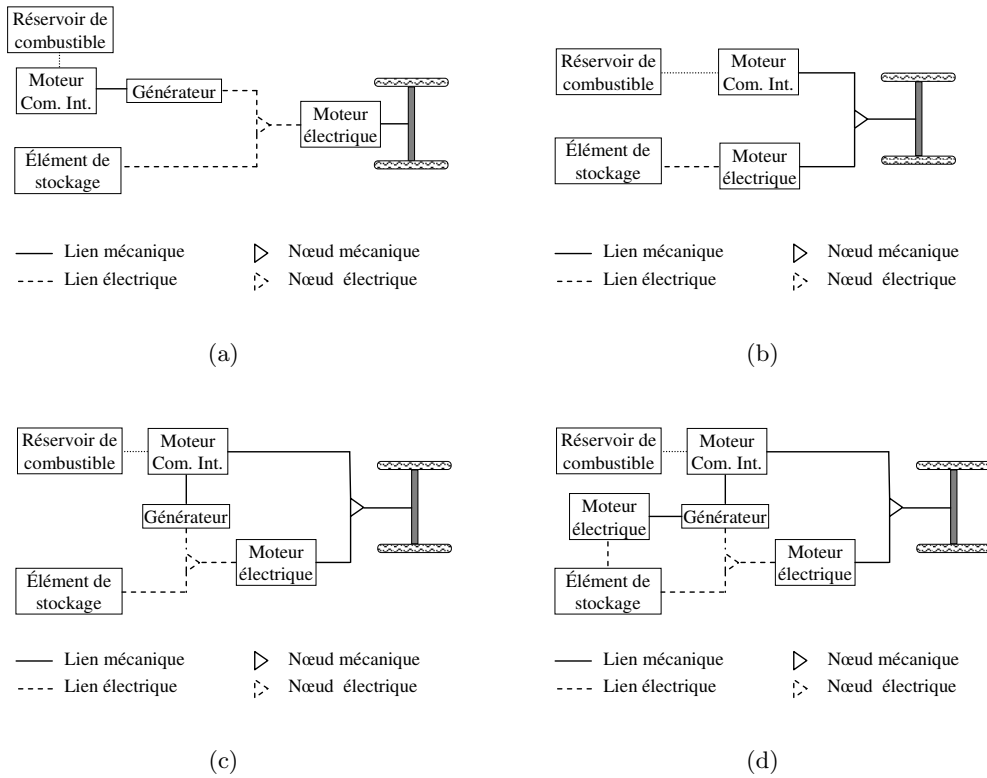


FIG. 1.2 – (a) Architecture Hybride Série ; (b) Architecture Hybride Parallèle ; (c) Architecture Hybride Série - Parallèle ; (d) Architecture Complexe

### 1.3.3 Véhicules hybrides à pile à combustible

Un véhicule hybride à pile à combustible se classe dans la catégorie des véhicules à architecture d'hybridation série dans laquelle l'ensemble moteur à combustion interne et générateur électrique est remplacé par une pile à combustible. Cette dernière est chargée de fournir l'énergie électrique nécessaire à la traction à partir d'une réaction chimique entre l'oxygène et l'hydrogène. La structure d'un véhicule hybride à pile à combustible est montrée dans la figure 1.3

## 1.4 La Pile à Combustible

### 1.4.1 Aperçu historique

Le principe de l'électrolyse inverse, ou la possibilité de produire de l'électricité à partir de la réaction chimique entre l'hydrogène et l'oxygène, est énoncé pour la première fois en 1802 par Sir Henry David. Partant de ce procédé, Sir William Grove souvent appelé « père de la pile à

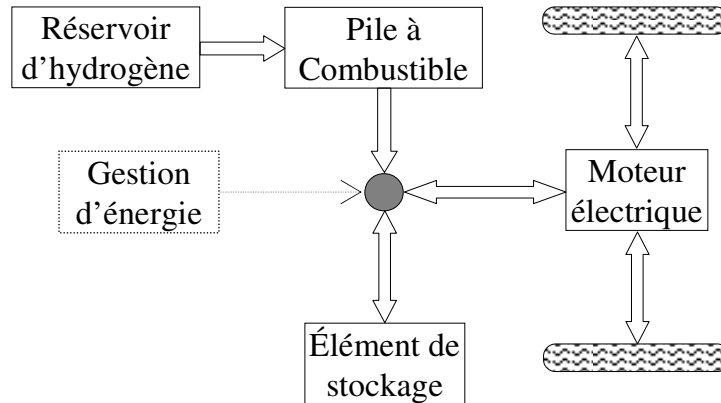


FIG. 1.3 – Structure d'un véhicule hybride à pile à combustible

combustible », expérimente en 1839 la première pile à combustible avec des électrodes en platine dans un milieu acide sulfurique dilué [Gro74]. Depuis, l'histoire de la pile à combustible a été marquée par les travaux de Ludwig Mond et Dr. Charles Langer [ML89], ceux de W.W. Jacques en 1896 [PF02], de Pr. Baur et ses étudiants [BT33] et de Sir F. Bacon qui a commencé ses travaux en 1933 [Bac69]. La course à l'espace annoncée après le lancement par les Soviétiques de Spoutnik en 1957 est l'évènement historique qui a marqué le plus le développement de la pile à combustible pour des applications spatiales avec notamment le programme Apollo. Cependant la commercialisation des piles à combustible n'a pas pu franchir un obstacle principal pour atteindre un succès considérable, cet obstacle étant le coût élevé de cette technologie et sa courte durée de vie.

#### 1.4.2 Principe de fonctionnement

Une cellule élémentaire forme le noyau de la pile à combustible. Cette cellule est responsable de la conversion électrochimique de l'énergie chimique contenue dans un combustible en une énergie électrique. La structure de base d'une cellule est formée d'un milieu conducteur ionique ou un électrolyte en contact avec une anode et une cathode de chaque côté comme montré dans la figure 1.4.

Dans une pile à combustible typique, l'anode (l'électrode négative) est alimentée en permanence en combustible et la cathode (l'électrode positive) en comburant qui est souvent l'oxygène



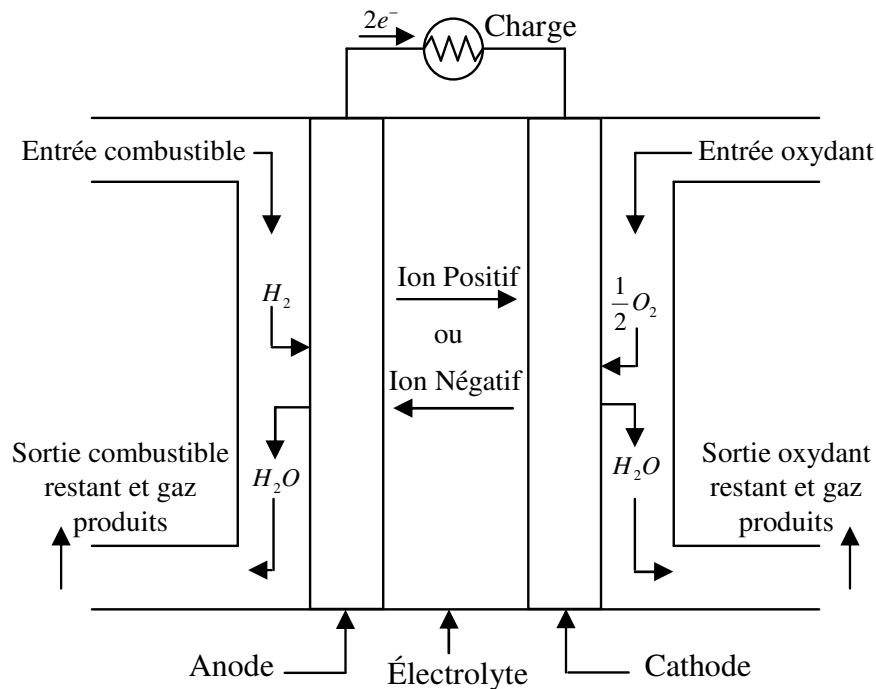


FIG. 1.4 – Schéma de principe d'une cellule de pile à combustible

de l'air. Les réactions électrochimiques ont lieu au niveau des électrodes pour produire un déplacement d'ions à travers l'électrolyte tout en créant un courant électrique complémentaire qui effectue un travail sur la charge [EG004]. Les piles à combustible sont classées selon le choix de l'électrolyte et du combustible utilisé déterminant ainsi les réactions aux électrodes et le type d'ions qui traversent l'électrolyte et conditionne de plus la température de fonctionnement de la pile.

### 1.4.3 Types de piles à combustible

La plupart des piles à combustible en développement utilisent l'hydrogène gazeux ou un gaz de synthèse riche en hydrogène produit par reformage d'hydrocarbures. Le tableau 1.1 énumère les différents types de piles conventionnelles classées selon leur électrolyte tout en précisant leur température de fonctionnement et la nature de l'ion porteur de charge [LD03]. A noter que parallèlement à cette classification, certaines piles sont classées selon le type de combustible utilisé notamment la pile à combustible au méthanol direct, DMFC, qui utilise le méthanol sans reformage ou la pile à combustible au carbone direct, DCFC, utilisant le carbone solide directement à l'anode.

TAB. 1.1 – Différents types de piles à combustible

Nomenclature	Type de PAC	Ion mobile	Température de fonctionnement
AFC	PAC à électrolyte alcalin	$OH^-$	50 - 200 °C
PEMFC	PAC à membrane échangeuse de protons	$H^+$	30 - 100 °C
PAFC	PAC à acide phosphorique	$H^+$	~ 220 °C
MCFC	PAC à carbonates fondus	$CO_3^{2-}$	~ 650 °C
SOFC	PAC à oxydes solides	$O^{2-}$	500 - 1000 °C

Notre étude portant sur des applications de transport en particulier des véhicules de passagers, la pile de type PEMFC se montre comme le choix le plus adéquat, car comparée à la pile DMFC, cette dernière présente l'inconvénient de son faible rendement et le fait de ne fonctionner qu'au méthanol ce qui la place dans une catégorie à part. Quant à la pile de type AFC, elle souffre de l'incompatibilité avec le  $CO_2$ , ce qui limite son application au domaine spatial ou sous-marin. Pour les piles fonctionnant à haute température, la dégradation des matériaux est assez élevée et par suite la durée de vie reste un défi énorme, ajouté à cela la nécessité d'un temps de démarrage relativement long (une dizaine de minutes pour une pile SOFC démarrant à froid) mais n'empêche pas son utilisation en tant qu'unité de puissance auxiliaire à bord d'un véhicule. En ajoutant les avantages que possède la pile PEMFC avec sa membrane solide (pas de fuites dues aux vibrations) et surtout avec sa densité massique de puissance la plus élevée la rendant assez compacte et économique, les études se concentrent sur ce type afin de surmonter les défis techniques et économiques permettant sa commercialisation. C'est donc une pile de type PEMFC que nous allons aborder dans la suite de notre étude.

#### 1.4.4 Pile à combustible de type PEM ou PEMFC

Une cellule élémentaire de pile à combustible de type PEM est généralement constituée de plaques bipolaires de graphite, conductrices de l'électricité, qui sont pressées contre l'assemblage membrane-électrodes. L'assemblage membrane-électrode forme le coeur électrochimique du système. Sur l'anode, l'hydrogène est dissocié en présence catalytique suivant la réaction :



Les ions d'hydrogène traversent le polymère électrolyte vers la cathode où ils sont combinés avec l'oxygène et les électrons de la cellule adjacente pour former de l'eau, selon la réaction :



L'électrolyte polymère qui caractérise ce type de pile, est un conducteur ionique sous la forme d'une membrane généralement en Nafion [MM04], de 50 à 175 µm d'épaisseur. Pour maintenir sa conductivité de protons, la membrane doit contenir suffisamment d'eau ; ainsi le maintien de la bonne teneur en eau est un des principaux aspects de la conception de ces piles. En outre, afin que les réactions électrochimiques se déroulent avec un rendement intéressant, les membranes doivent être catalysées. À ce jour, le platine s'est avéré être le meilleur catalyseur pour les deux réactions d'oxydation de l'hydrogène à l'anode d'une part et de réduction de l'oxygène à la cathode d'autre part [Lem90].

Dans une cellule élémentaire, la tension nominale est de l'ordre de 0,7V. Ainsi pour atteindre les niveaux de tension demandés pour des applications à plus large échelle, plusieurs cellules doivent être connectées en série pour former ce qu'on appelle un stack. Ceci dit, l'abréviation PAC, pour Pile à Combustible, utilisée dans ce manuscrit, désigne le stack complet ou l'empilement des cellules élémentaires.

### 1.4.5 Système PAC et auxiliaires

La pile à combustible décrite dans le paragraphe précédent, nécessite une série d'auxiliaires pour assurer son bon fonctionnement formant ainsi un système complet. Un modèle simple de ce système est montré dans la figure 1.5 [MB03]. La plupart des systèmes PAC présentent une configuration et des auxiliaires similaires. Le système PAC peut être divisé en quatre sous-systèmes : la pile elle-même, le circuit d'alimentation en hydrogène, le circuit d'alimentation en air et enfin le sous-système de gestion de l'eau et de la température.

#### 1.4.5.1 Circuit d'alimentation en hydrogène

Pour une pile fonctionnant à l'hydrogène direct, un circuit simple assure l'approvisionnement en hydrogène. L'hydrogène est généralement stocké sous forme gazeuse dans des réservoirs à haute pression (300 à 700 bars). Une régulation mécanique de pression par détendeur est utilisée dans ce cas pour amener l'hydrogène à une pression convenable (1 à 3 bars). L'hydrogène

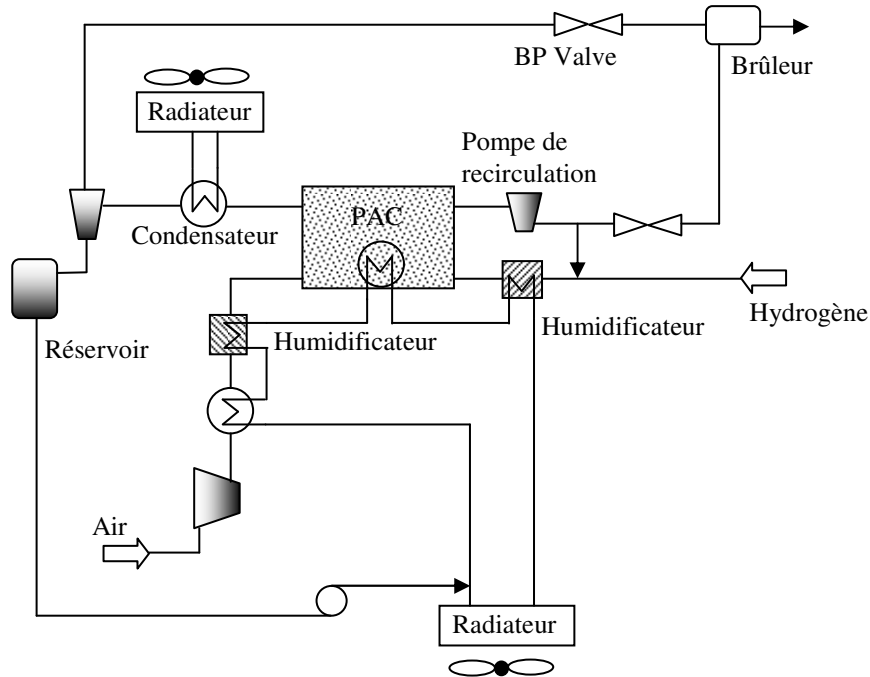


FIG. 1.5 – Système PAC et auxiliaires

est ensuite re-circulé moyennant une pompe pour maintenir une distribution de flux dans le compartiment anodique. L'anode peut également fonctionner en régime fermé et dans ce cas une purge occasionnelle contrôlée par une vanne doit être effectuée pour éviter la stratification de l'azote susceptible d'avoir traversé la membrane. Le résidu d'hydrogène est consommé dans un petit brûleur catalytique. Éventuellement, l'hydrogène est humidifié avec de l'eau dé-ionisée moyennant un système d'humidification à membrane.

#### 1.4.5.2 Circuit d'alimentation en air

Un compresseur sert à approvisionner la cathode de la pile avec de l'air moyennant un compresseur avec conditionnement externe de la température et de l'humidification. La pression à l'entrée de la pile est souvent contrôlée à l'aide d'une vanne commandée. Typiquement, l'air à la sortie sert à alimenter le brûleur catalytique en oxydant. L'air à la sortie du compresseur est conditionné à la température de la pile en utilisant un échangeur de chaleur alimenté avec l'eau du circuit de refroidissement. Comme l'anode, l'humidification de l'air est assurée par un humidificateur à membrane.

Les compresseurs utilisés dans ce type d'applications sont de type volumétrique. De part leur conception, les compresseurs volumétriques conviennent particulièrement bien pour traiter les débits de fluide relativement faibles, éventuellement très variables, et sous des rapports de pression relativement importants.

On distingue deux grandes familles dans les compresseurs volumétriques :

- Les compresseurs alternatifs : leurs mouvements de compression sont linéaires. Les compresseurs à pistons et à membranes font partie de cette famille.
- Les compresseurs rotatifs : dans cette catégorie de compresseurs, la diminution du volume fermé se fait par une ou plusieurs parties tournantes (rotors). Les compresseurs à palettes, à lobes, à spirale et à vis font partie de cette catégorie de compresseurs volumétriques.

Dans les applications à pile à combustible, ce sont les compresseurs rotatifs à vis qui sont généralement utilisés car ils n'ont pas besoin de lubrification.

### 1.4.5.3 Sous-systèmes de gestion d'eau et de température

Bien que la pile à combustible soit parmi les moyens les plus efficaces de conversion d'énergie à partir d'un combustible, elle produit tout de même une quantité non négligeable de chaleur à travers la réaction électrochimique. La température de fonctionnement de la pile, typiquement entre 60 et 80°C, étant faible comparée aux systèmes conventionnels, il est nécessaire de mettre en oeuvre un système de refroidissement avancé. Les échangeurs de chaleur utilisés pour cela, effectuent en parallèle différentes autres fonctions notamment le conditionnement de l'air à la sortie du compresseur à la température de la pile et la condensation de l'eau pour l'utiliser dans l'humidification de la pile.

La gestion de l'eau dans un système pile est essentielle pour maintenir une humidification continue de la membrane à travers l'humidification des gaz d'entrée. Différents systèmes plus ou moins compliqués assurent cette fonctionnalité. L'eau nécessaire à l'humidification est typiquement récupérée à la sortie de la cathode. Un condensateur à la sortie de la pile peut être utilisé en fonction de la température et de la pression comme montré dans la figure 1.5.

## 1.5 Etat actuel du marché des véhicules légers à pile à combustible

Le secteur des véhicules légers a considérablement augmenté en 2007, avec environ 300 nouveaux véhicules en 2007 et près de 500 nouveaux véhicules attendus avec la fin de 2008 (figure 1.6). Il s'agit notamment de flottes d'environ 100 véhicules chacune de Honda (FCX Clarity) et GM (Chevrolet Equinox) et de 200-300 véhicules(Bclass) de Daimler. Sont également inclus dans la part de 2008, les nouveaux véhicules conceptuels dévoilés cette année par GM, Hyundai, Chrysler et Toyota, et les 10 véhicules présentés par Shanghai Automotive pour les jeux olympiques de Pékin. En termes de région de fabrication, l'Europe est la principale région de fabrication 1.7(a) et reste avec l'Amérique du nord en tête des régions en terme de déploiement des voitures à pile à combustible en 2007/2008 (figure 1.7(b)) [But08].

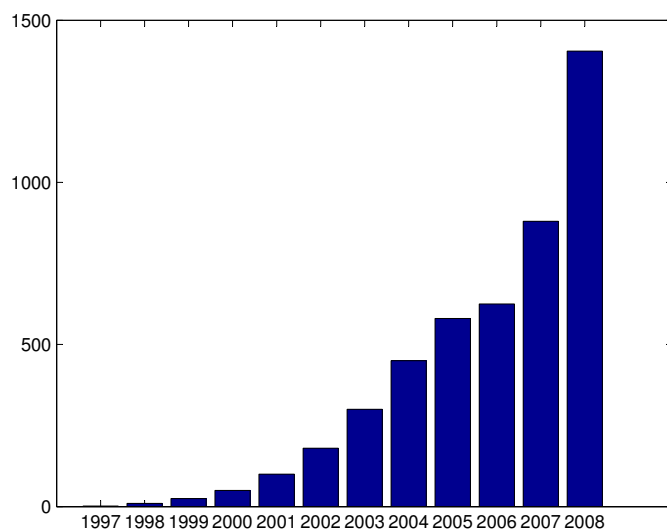


FIG. 1.6 – Cumulatif des nouveaux véhicules PAC légers [But08]

## 1.6 Le groupe électrogène hybride à pile à combustible

Comme nous l'avons déjà exposé, un véhicule hybride à pile à combustible se base sur un groupe électrogène hybride formé de l'association d'un système pile et d'un ou plusieurs éléments de stockage. Nous avons choisi, lors de notre étude, un modèle type de chaîne de traction

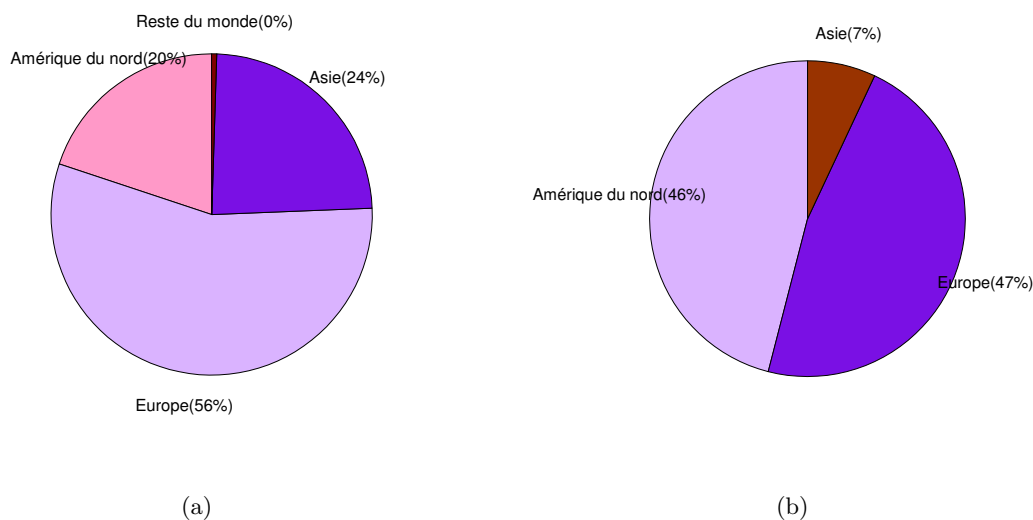


FIG. 1.7 – (a) Taux de fabrication par région en 2007-08 ; (b) Taux de déploiement par région en 2007-08 ; [But08]

schématisé dans la figure 1.8 [CLF+05]. Cette chaîne est composée du système PAC connecté sur un bus continu par l'intermédiaire d'un hacheur survolteur et d'un système de stockage d'énergie de type supercondensateur connecté sur le même bus continu par l'intermédiaire d'un hacheur réversible. Le groupe motopropulseur électrique, généralement alternatif synchrone, est connecté au bus continu par l'intermédiaire d'un onduleur de tension.

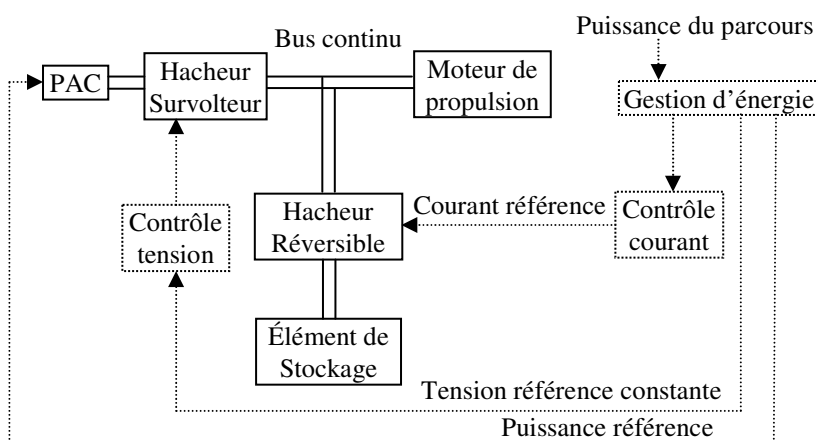


FIG. 1.8 – Schéma bloc du groupe électrogène hybride à pile à combustible GEPAC

### 1.6.1 Pack de supercondensateurs

Dans cette configuration hybride, la pile à combustible est généralement considérée comme la source principale d'énergie pour les demandes continues de puissance alors que les supercondensateurs jouent le rôle d'une source d'énergie secondaire assurant les demandes fortes et rapides de puissance lors des phases de démarrage, d'accélération et de freinage. Sur ce type de cahier des charges, l'utilisation des supercondensateurs à la place des éléments de stockage conventionnels tels les accumulateurs est favorisée. En effet, les différents types d'accumulateurs sont assez efficaces pour des applications à forte demande d'énergie qui nécessitent un faible courant sur une longue période, par contre ils ont des difficultés à fournir des pics de puissance sur une courte période sans mettre en péril leur durée de vie. A titre indicatif, une comparaison entre les performances des supercondensateurs et des accumulateurs de type plomb-acide est montrée dans le tableau 1.2 [Bur00]. Reste à préciser que les supercondensateurs ne sont pas en mesure de remplacer les batteries mais plutôt, une des technologies sera privilégiée suivant la stratégie d'hybridation utilisée et les profils de mission auxquels le véhicule est soumis. Une solution envisageable consiste à utiliser les deux en parallèle pour la traction, la pile et la batterie étant considérées comme sources d'énergie et les supercondensateurs comme sources de puissance [GME+03].

TAB. 1.2 – Comparaison entre les technologies de stockage conventionnelles

Performance	Batterie plomb-acide	Super conden- sateur	Condensateur conventionnel
Temps de charge	1 - 5 h	0,3 - 30 s	$10^{-3}$ - $10^{-6}$ s
Temps de décharge	0,3 - 3 h	0,3 - 30 s	$10^{-3}$ - $10^{-6}$ s
Energie (Wh/kg)	10 - 50	1 - 10	< 0,1
Cycle de vie	1000	> 500.000	> 500.000
Puissance spécifique (W/kg)	< 1000	< 10.000	< 100.000
Rendement	0,7 - 0,85	0,85 - 0,98	> 0,95

La technologie des supercondensateurs se base principalement sur le phénomène de double couche comme montré dans la figure 1.10. Comme dans les condensateurs conventionnels, dans un supercondensateur, deux conducteurs et un diélectrique génèrent un champ électrique où



l'énergie est stockée. L'application d'une différence de potentiel aux bornes du dispositif entraîne une séparation de charges à l'interface entre l'électrode et l'électrolyte. Deux couches de charges sont ainsi formées, avec un excès d'électrons sur un côté et un excès d'ions positifs de l'autre côté. Les molécules polaires qui résident entre ces deux forment le diélectrique. Les couches qui forment la plaque collectrice ainsi que le petit espace entre eux, créent une capacité très élevée. En outre, la structure de l'électrode en carbone activé, qui est généralement poreuse, augmente la surface effective d'environ  $2000 \text{ m}^2/\text{g}$  [Mah08].

Le schéma de la figure 1.9 représente un modèle du premier ordre d'un supercondensateur [You03]. La résistance série  $R_S$  appelée résistance série équivalente (ESR) contribue aux pertes d'énergie du supercondensateur lors de la charge ou décharge. La résistance parallèle  $R_P$  modélise le courant de fuite des supercondensateurs qui varie de quelques milliampères à des dizaines de milliampères. L'inductance série,  $L$ , est généralement très faible et est négligée pour un courant constant de charge /décharge [DP05]. Nous pouvons, dans le cas de notre application, négliger le courant de fuite et l'effet inductif pour en avoir un modèle équivalent simplifié formé d'une capacité en série avec une résistance comme montré dans la figure 1.9(b). Les variations de résistance ne seront pas non plus prises en compte.

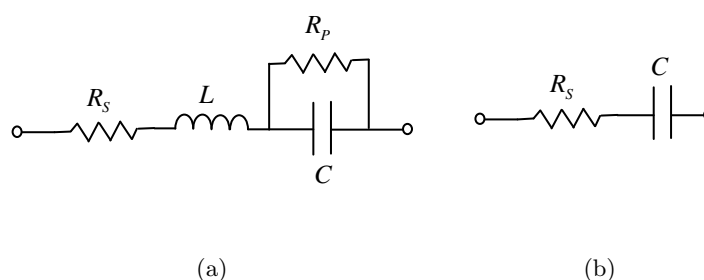


FIG. 1.9 – (a) Modèle du premier ordre d'un supercondensateur ; (b) Modèle simplifié du supercondensateur

Un supercondensateur unitaire présente une tension de l'ordre de 2,5 à 2,7 V ce qui fait que plusieurs éléments doivent être mis en série afin d'obtenir la tension demandée. Il est évident que mettre en série les condensateurs diminue leur capacité équivalente ainsi pour obtenir une capacité élevée à une tension demandée, un arrangement en série et en parallèle de plusieurs supercondensateurs est envisagée formant un module complet ou un pack.

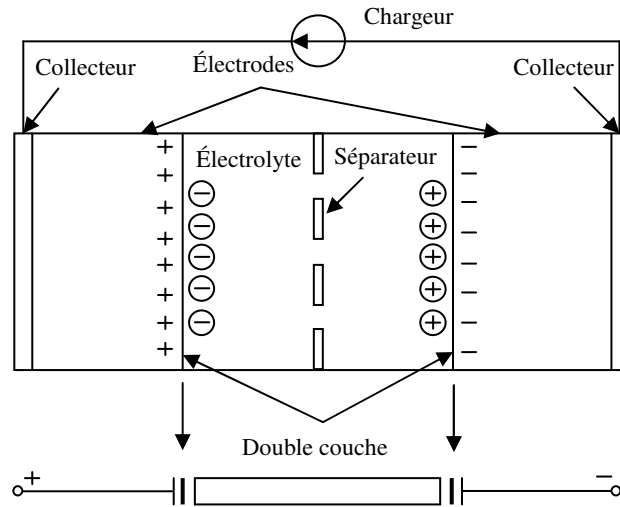


FIG. 1.10 – Schéma de principe d'un supercondensateur typique à double couche

### 1.6.2 Hacheur survolteur et réversible

Généralement, un réseau de tension continue fixe est créé dans un véhicule hybride permettant de brancher, d'une part le groupe générateur et d'autre part, le groupe motopropulseur ainsi que tous les auxiliaires utilisés à bord du véhicule. La connexion des deux sources d'énergie au bus continu est assurée à travers deux convertisseurs statiques continu - continu. Du côté de la pile à combustible, un hacheur parallèle ou élévateur de tension est généralement utilisé pour relever la tension de la pile à la tension de bus. Ce hacheur est commandé en tension afin de maintenir constante la tension de bus. D'autre part, la connexion de l'élément de stockage sur le bus continu est établie généralement par l'intermédiaire d'un hacheur survolteur réversible en courant, car le pack de supercondensateurs doit être capable d'absorber l'énergie récupérée en régime de freinage. Le hacheur réversible est commandé en courant afin de fixer le niveau de courant ou de puissance à fournir ou absorber à chaque instant par l'élément de stockage [LFC+03].

Le schéma électrique du hacheur survolteur est présenté dans la figure 1.11(a) alors que la figure 1.11(b) montre la structure du hacheur réversible en courant. La commutation est assurée par le transistor bipolaire à grille isolée, IGBT, un composant semi-conducteur de puissance qui rassemble les avantages du transistor bipolaire (chute de tension faible en conduction, tension

blocable élevée, rapport coût / puissance commutée convenable) et ceux du transistor MOSFET (commande en tension et vitesse élevée de commutation).

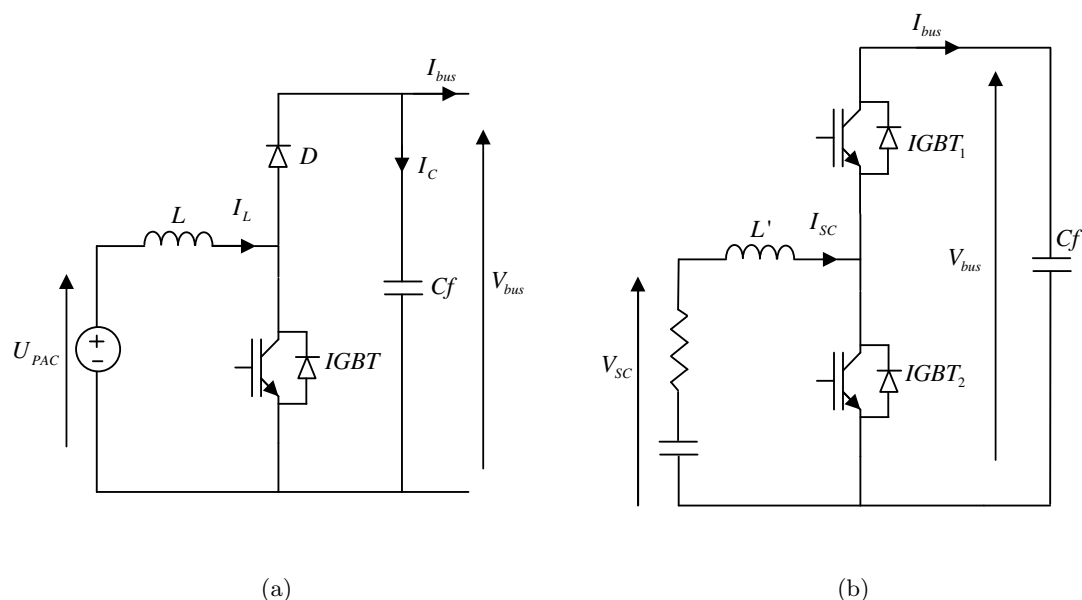


FIG. 1.11 – (a) Schéma constitutif d'un hacheur survolteur ; (b) Schéma d'un hacheur survolteur réversible en courant ;

### 1.6.3 Gestion de l'énergie du groupe électrogène

Le bloc de gestion d'énergie, montré dans la figure 1.8, est la cellule de commande du groupe électrogène. Elle sert à établir la consigne de tension constante pour le premier hacheur ainsi que la consigne de courant ou de puissance au second hacheur. Si la tension de bus est fixée a priori, la consigne instantanée de courant est directement liée à la stratégie d'énergie adoptée. En d'autres termes, le bloc de gestion d'énergie reçoit une demande de puissance du groupe motopropulseur sachant que cette puissance peut être positive (traction) ou négative (freinage) et en fonction de cette demande et de la stratégie de gestion implantée, fournit la consigne de puissance demandée à l'élément de stockage. La puissance de référence de la pile à combustible sera éventuellement la différence entre la puissance demandée par le groupe motopropulseur et la puissance fournie ou absorbée par l'élément de stockage.

Ce bloc de gestion d'énergie constitue le coeur de notre étude. La problématique traitée dans ce mémoire est de gérer la distribution de puissance entre les deux sources principales d'énergie

dans le but d'optimiser la consommation de combustible sur un cycle de mission donné.

#### 1.6.4 Cahier des charges et dimensionnement des éléments du groupe électrogène

Afin de caler notre étude sur des applications réelles, nous avons posé un cahier des charges fixant les ordres de grandeurs utilisées. Nous avons traité, dans ce mémoire, le cas d'un véhicule léger bien que l'extension vers d'autres types de véhicules notamment les véhicules lourds et les applications ferroviaires ou maritimes soit envisageable par une simple homothétie. Ainsi, en nous basant sur des configurations de prototypes de véhicules réels, nous choisissons une puissance électrique maximale demandée,  $P_{dem_{max}}$ , de 100KW, une puissance maximale de la pile à combustible,  $PPAC_{max}$ , de 70kW et 60kW de puissance maximale de l'élément de stockage,  $PES_{max}$ . Nous allons supposer de plus, que l'élément de stockage va pouvoir récupérer une énergie maximale de freinage,  $PES_{min}$ , égale à -60 kW. Enfin la tension du bus continu est fixée à 220 V. Le choix de ces puissances va affecter le dimensionnement de la pile, de l'élément de stockage ainsi que des convertisseurs utilisés. Encore faut-il préciser que le dimensionnement de ces éléments reste à titre indicatif et n'est en aucun cas un dimensionnement optimal vu que le but de notre étude est la gestion de la distribution des puissances dans un système supposé pré dimensionné. En outre, le dimensionnement d'une chaîne de ce type se fait traditionnellement en considérant les profils de mission dictés par l'usage. Le dimensionnement optimal est une réponse à un usage souhaité. De nombreux travaux mettant en relief le lien entre dimensionnement et profil de mission sont aujourd'hui développés [Arr07].

##### 1.6.4.1 Dimensionnement du stack de pile à combustible

Le nombre de cellules élémentaires formant la pile à combustible ainsi que la surface active de chacune d'elle doivent être choisis pour toute application considérée. Ces deux grandeurs sont en étroite relation avec, respectivement, la tension de la pile et le courant débité et donc la puissance fournie. En effet, la puissance électrique brute de la pile est calculée par la relation 1.3 :

$$P_{PAC} = U_{PAC} \cdot I_{PAC} = N_{cell} \cdot E_{cell} \cdot j \cdot S_{PAC} \quad (1.3)$$

Où  $P_{PAC}$  est la puissance fournie par la pile à combustible (W),  $U_{PAC}$  et  $I_{PAC}$  respectivement la tension et le courant de la pile,  $N_{cell}$  est le nombre de cellules élémentaires formant la pile,

$E_{cell}$  la tension par cellule (V),  $j$  la densité de courant ( $A/cm^2$ ) et  $S_{PAC}$  la surface active des cellules.

Cela dit, nous avons intérêt à augmenter la tension de la pile pour ainsi limiter le courant demandé et par suite les pertes du système. Ceci est fait d'une part, par l'augmentation du nombre de cellules jusqu'à la limite technologique permise et d'autre part, l'augmentation de la tension par cellule. Or, d'après la caractéristique de la pile, augmenter la tension de cellule diminue la densité de courant donc il faut augmenter la surface de cellule pour compenser le courant demandé. En revanche, augmenter la surface de la pile pénalise le coût et l'encombrement du système d'où la nécessité de trouver un compromis. Une limite raisonnable pour la densité de courant est de  $0,6$  ( $A/cm^2$ ) correspondant à une tension de cellule d'environ  $0,6$  V. [Lac04]

D'autre part, partant d'une tension bus de  $220$  V, il est préférable que la tension de la pile de descende pas sous  $120$  V pour limiter le gain du hacheur à  $2$  pour des raisons de rendement. Ce qui donne un nombre de cellules de  $200$ , un courant maximal de  $580$  A et une surface active de  $1000$   $cm^2$ . Une telle surface excédant la surface active des piles déjà commercialisées, une association en parallèle de plusieurs stacks s'avère nécessaire. Dans notre cas, deux stacks de  $500$   $cm^2$  de surface active chacun peuvent être suffisants. Une telle association nécessite une configuration adaptée et éventuellement l'utilisation d'un convertisseur spécifique pour chaque stack. Nous allons considérer par la suite du travail un seul stack de  $1000$   $cm^2$  de surface active théorique.

#### 1.6.4.2 Dimensionnement du pack de supercondensateurs

Le dimensionnement d'un pack de supercondensateurs consiste à déterminer le nombre d'éléments qu'il faut placer en série,  $N_S$ , et en parallèle,  $N_P$ , afin de satisfaire les contraintes en énergie et en puissance auxquelles il est soumis. Le modèle équivalent du pack de supercondensateurs (SC) est formé d'une capacité équivalente  $C_{SC}$  en série avec une résistance équivalente  $R_{SC}$  comme montré dans la figure 1.12. Les équations 1.4 à 1.7 relient les grandeurs électriques du pack aux grandeurs au niveau du condensateur élémentaire.

$$C_{SC} = \frac{N_P}{N_S} \cdot C_{elem} \quad (1.4)$$

$$R_{SC} = \frac{N_S}{N_P} \cdot R_{elem} \quad (1.5)$$

$$V_C = N_S \cdot V_{elem} \quad (1.6)$$

$$I_{SC} = N_P \cdot I_{elem} \quad (1.7)$$

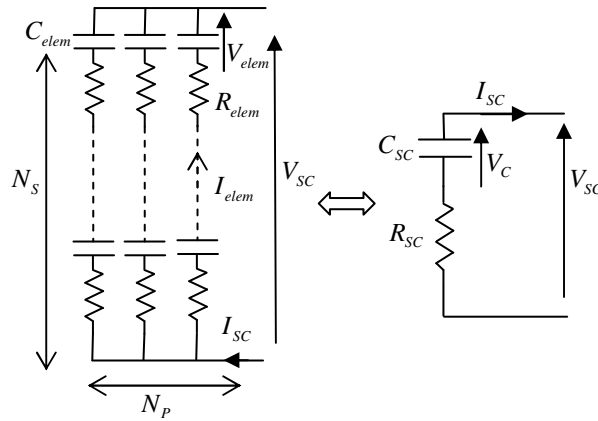


FIG. 1.12 – Modèle d'un pack de supercondensateurs

L'énergie maximale transférée par l'élément de stockage  $E_{max\_transf}$  est la différence entre son état d'énergie maximal  $E_{max}$  et minimal  $E_{min}$ . Elle est liée à la tension à vide maximale  $V_{Cmax}$  et  $V_{Cmin}$  minimale du pack par l'équation 1.8 :

$$E_{max\_transf} = E_{max} - E_{min} = \frac{1}{2} C_{SC} (V_{Cmax}^2 - V_{Cmin}^2) \quad (1.8)$$

Le nombre de supercondensateurs élémentaires  $N_{elem}$  nécessaires pour fournir la demande d'énergie maximale est ainsi donné par l'équation 1.9.

$$N_{elem} = N_P \times N_S = \frac{E_{max\_transf}}{C_{elem} \cdot V_{elem\_max}^2} \frac{2}{1 - k^2} \quad (1.9)$$

Où  $k$  est la profondeur de décharge définie par le rapport entre la tension minimale et maximale d'un élément.

L'énergie maximale transférée dépend du profil de puissance auquel l'élément de stockage est soumis. Dans ce contexte, nous avons choisi  $E_{max\_transf}$  égale à 1200 kW.s en se basant sur

des travaux antérieurs [Lac04]. Une étude plus précise pour un choix optimal de cette énergie peut être faite en fonction de la stratégie de gestion appliquée au profil de mission auquel le véhicule est soumis.

Nous avons choisi, à titre d'exemple, un supercondensateur de type BOOSTCAP des technologies MAXWELL [Max], notamment le BCAP2000 P270 dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau 1.3.

TAB. 1.3 – Caractéristiques du supercondensateur BCAP2000 P270

$C_{elem}$	$V_{elem\_max}$	$R_{elem}$
2000 F	2,7 V	0,35 mΩ

Ainsi pour une profondeur de décharge de 0,5, le nombre d'éléments,  $N_{elem}$ , est égal à 220. D'autre part, la puissance aux bornes du pack, donnée par l'équation 1.10, nous permet de calculer le courant élémentaire maximal correspondant à la puissance maximale de freinage de 60kW.

$$P_{SC} = N_{elem} \left( V_{elem} \cdot I_{elem} - R_{elem} \cdot I_{elem}^2 \right) \quad (1.10)$$

Ayant trouvé le courant élémentaire maximal, égal à 100 A, nous procédons pour calculer  $N_S$  et  $N_P$ . L'élément de stockage étant connecté au hacheur survolteur réversible, sa tension maximale doit être inférieure à la tension bus ainsi :

$$V_{SC} = N_S (V_{elem} - R_{elem} \cdot I_{elem}) < V_{bus} \quad \forall I_{elem}, V_{elem} \quad (1.11)$$

A partir de l'équation 1.11,  $N_P$  doit être plus grand que 2,7. En choisissant  $N_P$  égal à 3, le nombre d'élément en série,  $N_S$ , est égal à 74. Ceci dit, les différentes caractéristiques du pack de supercondensateurs utilisé dans notre étude sont regroupées dans le tableau 1.4.

TAB. 1.4 – Caractéristiques du pack de supercondensateurs

$C_{SC}$	$R_{SC}$	$V_{C\_max}$	$I_{C\_max}$	$E_{max}$	$E_{min}$
81 F	8,6 mΩ	198 V	300 A	1600 kW.s	400 kW.s

### 1.6.4.3 Dimensionnement des hacheurs

Le dimensionnement des hacheurs consiste à calculer la valeur des inductances de lissage  $L$  et  $L'$  (figure 1.11) utilisées pour limiter l'ondulation de courant dans les convertisseurs et la source ainsi que la valeur du condensateur de filtrage  $Cf$  qui permet de limiter les ondulations de tension dues au découpage en sortie du convertisseur. Les équations 1.12 à 1.14 [Lac04] sont utilisées à ce propos.

$$L = \frac{V_{bus}}{4 \cdot fp \cdot \Delta I_{L_{max}}} \quad (1.12)$$

$$Cf = \frac{IL}{4 \cdot fp \cdot \Delta V_{bus\_max}} \quad (1.13)$$

$$L' = \frac{V_{bus}}{4 \cdot fp \cdot \Delta I_{SC_{max}}} \quad (1.14)$$

Où  $fp$  est la fréquence de découpage du convertisseur,  $I_L$  et  $\Delta I_{L_{max}}$  sont respectivement le courant et l'ondulation de courant maximale dans l'inductance du survolteur (figure 1.13),  $\Delta I_{SC_{max}}$  l'ondulation maximale dans l'inductance du hacheur réversible et enfin  $\Delta V_{bus\_max}$  est l'ondulation maximale de tension aux bornes du condensateur.

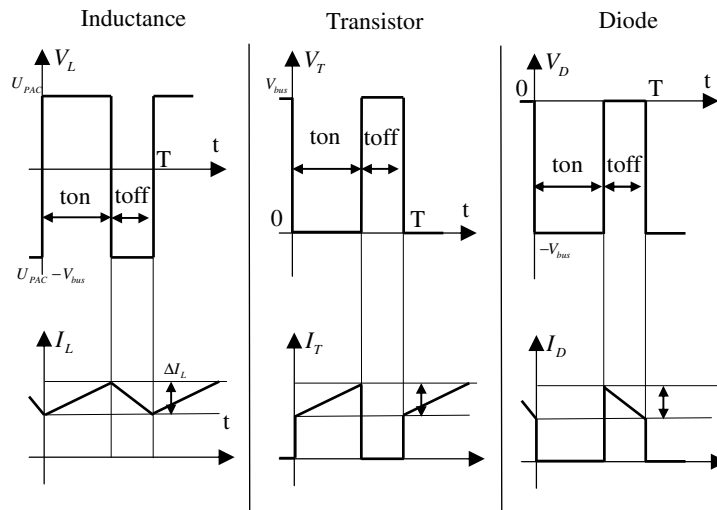


FIG. 1.13 – Formes d'ondes du hacheur survolteur



Les caractéristiques retenues pour les convertisseurs de puissance sont montrées dans le tableau 1.5.

TAB. 1.5 – Caractéristiques des convertisseurs de puissance

$f_p$	$\Delta I_{L\_max}$	$\Delta I_{SC\_max}$	$\Delta V_{bus\_max}$	$L$	$L'$	$C_f$
2 kHz	20 A	20 A	6 V	1,37 mH	1,37 mH	12 mF

## 1.7 Conclusion

Dans ce chapitre introductif, nous avons présenté la structure d'hybridation étudiée qui représente un groupe électrogène hybride à pile à combustible. Les différents éléments de ce groupe ont été dimensionnés dans le but de faire une étude homogène basée sur un cas réel de prototypes de véhicules hybrides légers. Le coeur de notre étude étant le bloc de gestion de l'énergie électrique, nous allons au cours des chapitres suivants explorer différentes stratégies de distribution instantanée optimale de puissance entre la pile à combustible et l'élément de stockage pour satisfaire la demande de puissance du groupe motopropulseur. La modélisation des éléments du groupe électrogène va nous permettre de caractériser les pertes dans le système complet. Cette étape est nécessaire pour remonter de la puissance brute au niveau du noeud électrique à la puissance ou l'énergie nette au niveau du réservoir de combustible d'une part et de l'élément de stockage d'autre part. Cette modélisation fait l'objet du second chapitre.



# Modélisation des Pertes dans le Groupe Électrogène Hybride à Pile à Combustible

## 2.1 Introduction

Le groupe électrogène hybride considéré (cf. chap. 1) est principalement formé de deux sources d'énergies électriques. Chacune de ces deux sources définit une voie représentant un certain flux d'énergie (figure 2.1). La voie primaire est formée du groupe électrogène à pile à combustible comportant PAC et auxiliaires associés au hacheur survolteur. D'autre part, une voie secondaire d'énergie est constituée par le pack de supercondensateurs ainsi que le hacheur réversible. Ces deux voies sont reliées au niveau du noeud électrique pour fournir la puissance nécessaire à la traction. Ainsi, la puissance fournie demandée,  $P_{dem}$  est la somme de la puissance utile du groupe électrogène,  $P_{PAC\_bus}$  et de la puissance utile de l'élément de stockage,  $P_{ES\_bus}$ . Or il est évident qu'une partie des puissances délivrées par les deux sources est perdue, sous forme de chaleur, le long du chemin. Il est nécessaire d'intégrer l'ensemble de ces pertes dans les algorithmes d'optimisation ou les stratégies de gestion d'énergie afin d'écartier automatiquement les points de fonctionnement à faible rendement.

Nous allons au cours de ce chapitre modéliser les pertes totales du groupe électrogène en fonction de la puissance utile fournie au niveau du bus continu d'une part et d'autre part, les

perdes du système de stockage en fonction de la puissance utile de ce système :

$$Pertes_{GEPAC} = f(P_{PAC\_bus}) \quad (2.1)$$

$$Pertes_{ES} = f(P_{ES\_bus}) \quad (2.2)$$

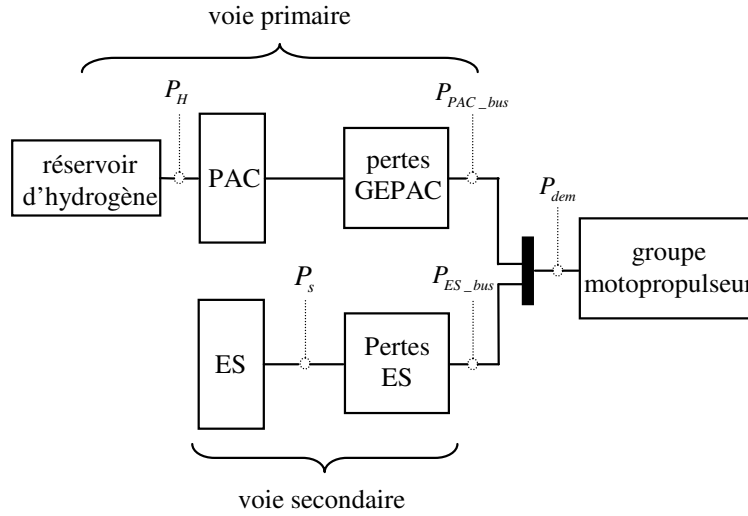


FIG. 2.1 – Distribution des puissances et des pertes dans la structure d'hybridation

## 2.2 Pertes dans le groupe électrogène à pile à combustible

Le groupe électrogène à pile à combustible comporte la pile à combustible elle-même, l'ensemble des ses auxiliaires et le convertisseur qui connecte la pile au bus continu. Le bilan énergétique de ce groupe est montré dans la figure 2.2. Les auxiliaires de la pile, notamment le compresseur d'air et les pompes de régulation de température et d'humidification sont connectés généralement au bus continu et consomment ainsi une partie de l'énergie électrique fournie par la pile à combustible. Nous allons limiter le calcul de ces pertes au compresseur d'air puisqu'il constitue l'élément le plus « gourmand » en puissance avec 80% de la puissance totale consommée par les auxiliaires [THPK04]. D'autre part, si la puissance absorbée par le compresseur dépend de la puissance fournie par la pile, en revanche celle des autres auxiliaires reste à peu

près constante ce qui fait que son expression présente moins d'influence majeure sur la stratégie de commande.

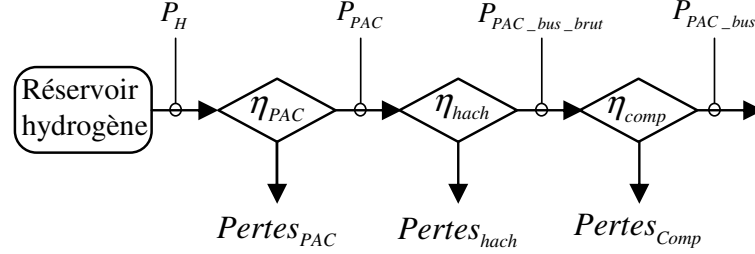


FIG. 2.2 – Bilan énergétique du groupe électrogène à pile à combustible

Pour résumer, les pertes totales considérées dans le groupe électrogène,  $Pertes_{GEPAC}$ , sont la somme des pertes de la pile,  $Pertes_{PAC}$ , celles du hacheur,  $Pertes_{hach}$ , et du compresseur,  $Pertes_{comp}$ , comme présentées dans l'équation 2.3. Soit, en d'autres termes, le rendement total de la conversion de l'énergie électrique dans ce groupe à partir du réservoir d'hydrogène,  $\eta_{GEPAC}$  est la multiplication du rendement de la pile  $\eta_{PAC}$ , celui du hacheur survolteur  $\eta_{hach}$  et enfin celui du compresseur  $\eta_{comp}$  selon les équations 2.4 à 2.7.

$$Pertes_{GEPAC}(P_{PAC\_bus}) = Pertes_{PAC}(P_{PAC\_bus}) + Pertes_{hach}(P_{PAC\_bus}) + Pertes_{comp}(P_{PAC\_bus}) \quad (2.3)$$

$$\eta_{GEPAC} = \eta_{PAC} \cdot \eta_{hach} \cdot \eta_{comp} \quad (2.4)$$

$$\eta_{PAC} = \frac{P_{PAC}}{P_H} \quad (2.5)$$

$$\eta_{hach} = \frac{P_{PAC\_bus\_brut}}{P_{PAC}} \quad (2.6)$$

$$\eta_{comp} = \frac{P_{PAC\_bus}}{P_{PAC\_bus\_brut}} \quad (2.7)$$

Nous allons détailler dans les paragraphes suivants les rendements de chacun de ces éléments tout en mettant l'accent sur la pile à combustible qui reste l'élément clef de notre étude.

## 2.3 Rendement de la pile à combustible

Le rendement d'une pile à combustible peut être défini par le rapport entre l'énergie utile produite durant un intervalle de temps et l'énergie totale fournie au système [ASM02]. Nous excluons de l'étude la possibilité de récupération de la chaleur produite par la pile moyennant un système de cogénération ce qui limite l'énergie utile à l'énergie électrique. Si l'énergie électrique est facilement calculée, l'énergie d'entrée et de sortie chimique est néanmoins moins facile à déterminer [LD03]. Les notions thermodynamiques mises en jeu dans l'expression du rendement énergétique de la pile à combustible sont brièvement expliquées dans l'annexe A.

### 2.3.1 Rendement énergétique de la pile à combustible

L'enthalpie libre est la fonction d'état la mieux adaptée pour représenter l'énergie récupérée lors d'une réaction chimique se produisant à pression et à température constante. C'est le cas de la réaction chimique d'oxydo-réduction qui caractérise la pile à combustible. Ainsi l'énergie électrique maximale que la pile peut fournir est égale à la variation de l'énergie libre de Gibbs, ce qui implique que le rendement maximal appelé rendement thermodynamique,  $\eta_{therm}$  est le rapport entre la variation de l'énergie de Gibbs et celle de l'enthalpie :

$$\eta_{therm} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (2.8)$$

Or, pour chaque mole d'hydrogène utilisée le flux de charges à travers le circuit externe est  $-2F$  (C). Le travail électrique nécessaire est ainsi égal à  $-2F \cdot E$  où  $F$  est la constante de Faraday et  $E$  est la force électromotrice ou encore le potentiel réversible. En remplaçant  $\Delta G$  par sa valeur, par mole d'hydrogène, dans l'équation 2.8, le rendement thermodynamique est représenté par l'équation 2.9

$$\eta_{therm} = \frac{-2E \cdot F}{\Delta h} \quad (2.9)$$

$\Delta h$  étant la variation d'enthalpie de la réaction par mole d'hydrogène.

D'autre part, l'existence de surtensions aux électrodes et de résistance dans l'électrolyte, produit un plus faible potentiel  $U$ . En posant l'hypothèse que le rendement de la pile à combustible

est égal au rendement d'une cellule élémentaire, la valeur de ce rendement,  $\eta_{PAC}$  devient ainsi :

$$\eta_{PAC} = \frac{-2V_{PAC} \cdot F}{N_{cell}\Delta h} \quad (2.10)$$

$N_{cell}$  étant le nombre de cellules élémentaires formant la pile.

Deux valeurs sont utilisées pour la variation de l'enthalpie de formation,  $\Delta h$  [LD03]. La première, égale à  $-241,83kJ.mol^{-1}$  est appelée le pouvoir calorifique inférieur (PCI) en considérant que l'eau produite est à l'état vapeur alors que la seconde,  $-285,84kJ.mol^{-1}$  est le pouvoir calorifique supérieur (PCS) en supposant que la vapeur d'eau est condensée en liquide. Il est nécessaire donc dans l'expression du rendement de préciser lequel des deux pouvoirs est utilisé dans le calcul. Nous retenons l'expression du rendement par rapport au PCS, exprimée dans l'équation 2.10.

$$\eta_{PAC} = \frac{V_{PAC}}{1,48N_{cell}} \quad (2.11)$$

L'expression de la tension de la pile à combustible pour une certaine demande de puissance,  $V_{PAC}(P_{PAC})$ , fera l'étude de la section suivante. Il faut enfin préciser que le calcul de ce rendement ne tient pas compte du rendement faradique généralement unitaire pour une pile fonctionnant à l'hydrogène pur, ni du rendement matière qui tient compte de l'hydrogène non consommé, brûlé par exemple dans le brûleur catalytique.

### 2.3.2 Modèle PAC

Un modèle permettant de prédire la réponse en tension pour une demande de puissance de la pile à combustible s'avère une nécessité incontestable. Ce modèle doit pouvoir représenter la performance de la pile en régime permanent en vue de son utilisation dans le calcul du rendement de l'équation 2.11 aussi bien qu'en régime dynamique pour une éventuelle intégration dans un simulateur complet de la chaîne de traction.

Différentes approches de modélisation de pile ont d'ores et déjà été adoptées. Ces approches peuvent être répertoriées en plusieurs classes. Nous différencions par là les modèles qui traitent le coeur de pile, [BV92] [SWG93] [RL01] .., des modèles à l'échelle du système de pile, [BFHN00] [FWMB00] ... A savoir aussi que plusieurs modèles traitent uniquement une partie caractéristique

de la pile. Aussi nous distinguons les modèles ne tenant compte que du régime statique, [BFHN00] [FWMB00] .., des modèles traitant les régimes dynamiques ou transitoires, [WBS<sup>+</sup>98] [PPS02] [Iqb03].. Nous différencions également les modèles mécanistiques des modèles de comportement. Les premiers sont généralement des modèles électrochimiques de complexité proportionnelle à la précision requise, [FRD04] [BV92] [SWG93] [RL01] .., alors que les modèles de comportement traitent la pile en tant que boîte noire. Ces derniers sont assez efficaces en régime permanent ou en modes de fonctionnement transitoire mais nécessitent une phase d'expérimentation ou d'apprentissage souvent intense [JHPK02]. A noter de plus, que plusieurs outils servent à présenter les modèles issus d'équations mathématiques comme par exemple les modèles de circuits électriques [FG03] [CNS05].

Le modèle adopté dans cette étude se base sur le modèle quasi statique et semi empirique d'Amphlett [ABM<sup>+</sup>95] initialement conçu pour une cellule élémentaire de pile à combustible. L'extension de ce modèle au niveau d'une pile formée de  $N_{cell}$  cellules a été ainsi étudiée fixant des hypothèses de simplification. Ces hypothèses sont assurées par le fait que la pile et ses auxiliaires sont supposés convenablement commandés [CLF<sup>+</sup>05] en contrôlant les différents points de fonctionnement en pression, débit, température et humidification. Nous allons exposer, dans les paragraphes suivants, les bases de ce modèle, les hypothèses de simplification ainsi que les modifications apportées au modèle pour tenir compte du régime dynamique. Enfin, l'identification des paramètres du modèle ainsi que sa validation expérimentale ont été réalisées moyennant des piles de 20 cellules ou de 3 cellules et sont donc supposées valables par extrapolation pour la pile de 200 cellules de notre étude [HCHF06] [SHHM06].

### 2.3.2.1 Caractérisation de la tension

La tension de la pile à combustible,  $U_{PAC}$ , dépend du courant dans la pile  $I_{PAC}$ , des pressions partielles de l'hydrogène et de l'oxygène dans le compartiment anodique et cathodique,  $P_{H_2}$  et  $P_{O_2}$ , ainsi que de la température de la réaction,  $T_{PAC}$ , et l'hydratation de la membrane,  $\lambda_{H_2O}$  :

$$U_{PAC} = f(I_{PAC}, P_{O_2}, P_{H_2}, T_{PAC}, \lambda_{H_2O}) \quad (2.12)$$

Au niveau d'une cellule élémentaire, le modèle quasi statique, issu des travaux d'Amphlett [ABM<sup>+</sup>95] est utilisé pour prédire la réponse en tension de la cellule en fonction du courant, de la température et des pressions partielles des gaz réactifs. La tension d'une cellule élémentaire,



$U_{cell}$  est égale au potentiel électrodynamique auquel viennent s'ajouter les chutes de tension d'activation et les chutes ohmiques dues à la résistance interne de la cellule :

$$U_{cell} = E + \eta_{act} + \eta_{ohm} \quad (2.13)$$

Le potentiel thermodynamique  $E$  est défini comme suit [ABM<sup>+</sup>95] :

$$E = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3} [T_{cell} - 298.15] + 4.3085 \cdot 10^{-5} T_{cell} [\ln(P_{H_2}) + 0.5 \ln(P_{O_2})] \quad (2.14)$$

Où  $T_{cell}$  est la température de la cellule en Kelvin,  $P_{H_2}$  et  $P_{O_2}$  sont respectivement les pressions partielles effectives de l'hydrogène et l'oxygène (en bar) supposées mesurées au niveau des sites catalytiques.

Les coefficients présents dans cette équation sont relatifs à la réaction électrochimique et sont donc maintenus constants pour tout type de pile.

La chute de tension d'activation est produite à cause de l'activité énergétique intensive due à la formation et séparation des liens chimiques à l'anode et à la cathode. Elle est définie comme suit :

$$\eta_{act} = \xi_1 + \xi_2 \cdot T_{cell} + \xi_3 \cdot T_{cell} \cdot \ln(C_{O_2}) + \xi_4 \cdot T_{cell} \cdot \ln(I_{cell}) \quad (2.15)$$

Avec :

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 \cdot 10^{-6} \cdot \exp\left(\frac{-498}{T_{cell}}\right)} \quad (2.16)$$

Où  $C_{O_2}$  est la concentration d'oxygène et  $\xi_i$ ,  $i = 1, ., 4$  représentent les coefficients paramétriques constants qui seront identifiés expérimentalement.

Finalement, la chute de tension ohmique est définie à travers la loi d'ohm :

$$\eta_{ohm} = -R_m \cdot I_{cell} \quad (2.17)$$

Où  $R_m$  représente la résistance au transfert des protons dans la membrane.

Une troisième chute de tension, non représentée dans l'équation 2.13, est due aux pertes par diffusion et noyage. Elle représente la restriction du transport des gaz réactifs jusqu'aux sites réactifs. Ce phénomène se produit principalement à courant élevé et ne doit pas être atteint en fonctionnement car le noyage détériore très fortement et éventuellement durablement les performances de la pile.

### 2.3.2.2 Hypothèses de simplification

Bien que le modèle ainsi décrit soit à l'échelle d'une cellule élémentaire, son extension au niveau de la pile formée de plusieurs cellules élémentaires est rendue possible en multipliant la tension d'une cellule par le nombre total de cellules,  $N_{cell}$  sous les hypothèses suivantes :

- La température à l'intérieur de la pile est supposée répartie de façon uniforme et maintenue constante le long du fonctionnement de la pile par l'application d'une loi de commande efficace.
- Les pressions partielles des gaz sont considérées constantes à l'intérieur de la pile et cela en négligeant les chutes de pression dans les canaux de distribution des gaz dues aux interactions gaz/membrane et gaz/gaz alors que les pressions figurant dans les équations d'Amphlett sont au niveau de l'interface électrode/gaz. De même, à l'exemple de la température, la pression à l'entrée des compartiments anodique et cathodique est supposée maintenue constante.
- La densité de courant est supposée constante dans toute la pile.
- Le système de régulation de l'hygrométrie étant adéquat, une saturation en vapeur d'eau donc une hygrométrie de 100% est assurée coté cathodique et anodique.
- Le flux d'entrée d'air est contrôlé et notamment un rapport stoechiométrique cathodique est maintenu constant.
- Le phénomène de noyage de la membrane par l'excès d'eau n'est pas pris en compte.
- La migration des molécules d'oxygène et d'azote de la cathode vers l'anode à travers la membrane est supposée négligeable.

Cela dit, la loi de tension s'écrit alors :

$$U_{PAC} = N_{cell} \cdot (E + \eta_{act} + \eta_{ohm}) \quad (2.18)$$

Dans cette formulation, la température et le courant sont ainsi considérés au niveau de la pile,  $T_{PAC}$  et  $I_{PAC}$ . L'expression des pressions partielles de l'hydrogène et de l'oxygène respectivement

dans le compartiment anodique et cathodique est traitée dans le paragraphe suivant.

### 2.3.2.3 Elaboration du modèle

#### Anode

En raison des hypothèses de simplification citées dans le paragraphe 2.3.2.2,  $P_{H_2}$  s'écrit sous la forme :

$$P_{H_2}(t) = P_{anode} - P_{H_2O_{sat}}(T_{pac}) \quad (2.19)$$

Avec :

$$P_{H_2O_{sat}}(T_{pac}) = \exp\left(23,1961 - \frac{3816,44}{T_{pac} - 46,13}\right) \quad (2.20)$$

Où  $P_{H_2O_{sat}}$  est la pression de saturation de la vapeur d'eau (en Pascal) et  $P_{anode}$  la pression du compartiment anodique supposée constante (en Pascal).

Le débit entrant dans le compartiment,  $F_{H_2}(t)$  est égal à la somme du débit d'hydrogène consommé par la réaction (mol/s),  $(F_{H_2})_{cons}(t)$  et du débit d'hydrogène perdu à la sortie de la vanne de purge,  $(F_{H_2})_{purge}(t)$  (équation 2.21) sachant que le débit d'hydrogène consommé est lié au courant débité par la pile par l'équation 2.22.

$$F_{H_2}(t) = (F_{H_2})_{cons}(t) + (F_{H_2})_{purge}(t) \quad (2.21)$$

$$(F_{H_2})_{cons}(t) = \frac{N_{cell}I_{pac}(t)}{2F} \quad (2.22)$$

#### Cathode

Afin de préserver le comportement dynamique de la boucle d'oxygène, une attention particulière est prise dans le calcul de la pression partielle de l'oxygène. En considérant que des lois de commande adéquates [CLF<sup>+</sup>05] sont appliquées au compresseur d'air et à la vanne de sortie de la cathode, un rapport de stoechiométrie fixe,  $St_{O_2}$ , est assuré du coté de l'oxygène. Dans ce cas, le débit d'oxygène,  $F_{O_2\_en}$ , et éventuellement d'air,  $F_{air\_en}$ , à l'entrée de la cathode sont

calculés en fonction du courant de la pile,  $I_{PAC}$ , selon les équations 2.23 et 2.24.

$$F_{O_2\_en} = \frac{N_{cell} \cdot I_{PAC} \cdot St_{O_2}}{4 \cdot F} \quad (2.23)$$

$$F_{air\_en} = \frac{N_{cell} \cdot I_{PAC} \cdot St_{O_2}}{X_{O_2} \cdot 4 \cdot F} \quad (2.24)$$

sachant que la fraction molaire d'oxygène dans l'air,  $X_{O_2}$ , vaut normalement 21%.

A un instant  $t$  donné, le nombre de moles d'oxygène présents dans la cathode,  $n_{O_2}$  est donné par l'équation suivante :

$$n_{O_2} = \frac{1}{N_{cell}} \int F_{O_2\_en} - F_{O_2\_cons} \quad (2.25)$$

où  $F_{O_2\_cons}$  représente le débit d'oxygène consommé.

Le nombre total de moles présentes dans la cathode étant donné par la loi des gaz parfait de l'équation 2.26, la pression partielle d'oxygène est alors calculée selon l'équation 2.27

$$n_{cath} = \frac{P_{cath} \cdot V_{cath}}{R \cdot T_{PAC}} \quad (2.26)$$

$$P_{O_2} = \frac{n_{O_2}}{n_{cath}} P_{cath} \quad (2.27)$$

Un ajustement est apporté au modèle pour tenir compte de problèmes de nature pratique. En effet, dans le modèle original développé par Amphlett, les expressions de pressions figurant dans la loi de tension sont considérées à l'interface entre le gaz et les électrodes. Par conséquent, le passage à un système de pile de plusieurs cellules suppose que la pression est constante et bien connue dans le compartiment cathodique (ou anodique). Or dans des applications expérimentales l'accès à la pression à l'intérieur du compartiment n'est pas possible. En revanche, les pressions d'entrée ou de sortie sont mesurées en amont ou en aval de la pile. Ceci dit, pour tenir compte de l'évolution de la pression à l'intérieur du compartiment et donc des chutes de pression liées à la diffusion entre les gaz et les pertes de charge dans les canaux, une forme adaptée de l'équation de Darcy-Weisbach est utilisée permettant d'exprimer la chute de pression en fonction du débit des fluides.

Dans les essais de validation expérimentale, la pression de sortie  $P_{air\_s}$  est la pression atmosphérique. La pression dans le compartiment cathodique,  $P_{cath}$  est ainsi exprimée en fonction de

la puissance de sortie et du débit d'air en aval de la pile,  $F_{air\_s}$ . En outre, les différents coefficients dans l'équation de Darcy sont constants pour un système donné en négligeant l'influence de la variation du nombre de Reynolds. Ces coefficients ont été simplifiés par un seul coefficient expérimentalement identifié,  $K_{int}$ . Par conséquent, la pression cathodique est exprimée par l'équation suivante :

$$P_{cath} - P_{air\_s} = K_{int} \cdot F_{air\_s}^2 \quad (2.28)$$

Avec :

$$F_{air\_s} = F_{air\_en} - F_{O_2\_cons} \quad (2.29)$$

#### 2.3.2.4 Identification paramétrique

Le modèle simplifié déjà évoqué, implanté sous Matlab - Simulink simule la réponse en tension de la pile à combustible pour une sollicitation de courant. Ce modèle présente un ensemble de paramètres qui doivent être estimés soit expérimentalement soit en utilisant certaines valeurs déjà existantes dans de précédentes recherches. Cet ensemble regroupe les paramètres propres à loi de tension, à savoir les différents  $\xi_i$  et la résistance interne,  $R_m$ , (équations 2.15 et 2.17) ainsi que le coefficient  $K_{int}$  relatif à la relation 2.28. Dans les deux cas, ces paramètres sont spécifiques au type de pile à combustible aussi bien qu'aux conditions de fonctionnement. Ainsi, une estimation expérimentale de ces paramètres s'avère nécessaire.

L'identification paramétrique est faite moyennant un ensemble d'essais statiques effectués sur un banc d'essais de 1kW conçu et réalisé au sein du laboratoire FEMTO-ST de Belfort [HFJM03], [HCF<sup>+</sup>05]. La pile utilisée est formée de 20 cellules élémentaires du fabricant allemand ZSW équipée de membranes GORE MESGA Primea série 5510, d'une surface active de 100  $cm^2$  et une puissance nominale de 700W. Ces essais sont effectués sous différentes températures variant entre 298K et 323K et différents rapports stoechiométriques cathodiques entre 4 et 6 avec une humidité relative fixe de 100%. Un exemple de ces courbes de polarisation est montré dans la figure 2.3. Le tableau 2.1 résume les différents paramètres mesurés sur le banc d'essais et utilisés dans l'identification.

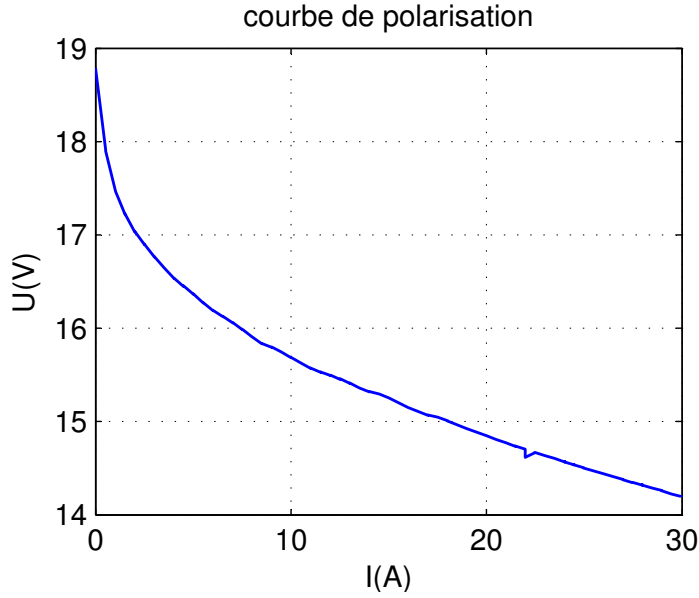


FIG. 2.3 – Exemple de la courbe expérimentale de polarisation pour la pile de 20 cellules

Rappelons l'équation de la loi de tension déjà présentée dans l'équation 2.18 :

$$U_{PAC} = N_{cell} \cdot (E + \eta_{act} + \eta_{ohm}) \quad (2.30)$$

Le principe de la méthode d'identification est une régression linéaire multiple par la méthode des moindres carrés [CML06]. Dans une régression multiple, nous cherchons à prédire, avec le plus de précision possible, les valeurs prises par une variable  $y$ , dite endogène, à partir d'une série de variables explicatives  $x_1, x_2, \dots, x_p$ . Dans le cas de la régression linéaire multiple, la variable endogène et les variables exogènes sont toutes quantitatives (continues) et le modèle de prédiction est linéaire. En disposant de  $n$  observations du système, l'équation de régression s'écrit :

$$y_i = a_0 + a_1 x_{i,1} + \dots + a_p x_{i,p} \quad i = 1 \dots n \quad (2.31)$$

Où  $a_0, \dots, a_p$  sont les coefficients du modèle à estimer en exploitant les observations.

La première étape dans la démarche suivie est l'écriture du système sous forme d'un modèle de régression. Dans cette perspective, les pressions partielles de l'oxygène et de l'hydrogène sont exprimées selon les équations simples 2.32 et 2.33 en considérant une pression moyenne dans les

TAB. 2.1 – Liste de grandeurs mesurées lors des expérimentations

<b>Symbole</b>	<b>Description</b>
$V_{cell}$	Tension d'une cellule (V)
$U_{PAC}$	Tension de la pile (V)
$I_{PAC}$	Courant dans la pile (A)
$T_{PAC}$	Température de pile (K)
$F_{air\_en}$	Débit d'air à l'entrée de la pile (l/min)
$F_{air\_s}$	Débit d'air à la sortie de la pile (l/min)
$F_{H_2\_en}$	Débit d'hydrogène à l'entrée (l/min)
$F_{H_2\_s}$	Débit d'hydrogène à la sortie (l/min)
$P_{air\_en}$	Pression d'air à l'entrée de la pile (mbar)
$P_{air\_s}$	Pression d'air à la sortie de la pile (mbar)
$P_{H_2\_en}$	Pression d'hydrogène à l'entrée (mbar)
$P_{H_2\_s}$	Pression d'hydrogène à la sortie (mbar)

compartiments anode et cathode de la PAC :

$$P_{O_2} = \frac{21}{100} \left( \frac{P_{air\_en} + P_{air\_s}}{2} - P_{sat} \right) \times 10^{-5} \quad (2.32)$$

$$P_{H_2} = \left( \frac{P_{H_2\_en} + P_{H_2\_s}}{2} - P_{sat} \right) \times 10^{-5} \quad (2.33)$$

La matrice de données utilisée dans la procédure d'identification est formée à partir des différents vecteurs de mesures présentés dans le tableau 2.1.

Posons :

$$W = \frac{U_{PAC}}{N_{cell}} - E \quad (2.34)$$

$$X = T_{PAC} \text{ , } Y = T_{PAC} \ln(P_{O_2}) \text{ , } Z = T_{PAC} \ln(I_{PAC}) \text{ and } R = I_{PAC} \quad (2.35)$$

$$a = \xi_1 + 498\xi_3, \quad b = \xi_2 - \xi_3 \ln(5.08 \times 10^6), \quad c = \xi_3, \quad d = \xi_4 \text{ and } e = -R_m \quad (2.36)$$

L'équation de tension s'écrit alors :

$$W = a + bX + cY + dZ + eR \quad (2.37)$$

Cette écriture correspond bien à l'équation 2.31 en remarquant que le vecteur  $W$  représente les variables  $y_i$   $i = 1, n$  de même pour les variables explicatives. La méthode des moindres carrés est ensuite utilisée pour estimer les paramètres du modèle de l'équation 2.37. Cette méthode nécessite la minimisation d'un critère,  $\Pi$ , qui n'est autre que l'erreur quadratique :

$$\Pi = \sum_{i=1}^n [W_i - (a + bX_i + cY_i + dZ_i + eR_i)]^2 \quad (2.38)$$

Les dérivées partielles de  $\Pi$  dans les directions des paramètres sont ainsi nulles :

$$\frac{\partial \Pi}{\partial a} = \frac{\partial \Pi}{\partial b} = \frac{\partial \Pi}{\partial c} = \frac{\partial \Pi}{\partial d} = \frac{\partial \Pi}{\partial e} = 0 \quad (2.39)$$

On obtient ainsi un système de 5 équations à 5 inconnues dont la résolution nous donne les valeurs des différents paramètres, groupés dans le tableau 2.2. La même procédure est utilisée pour l'estimation de  $K_{int}$ . Un résultat assez satisfaisant est obtenu sur l'ensemble des essais statiques avec une erreur relative moyenne ne dépassant pas les 2% entre la tension mesurée sur la pile et la tension estimée par le modèle.

TAB. 2.2 – Liste des paramètres identifiés du modèle de tension de la pile

$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$	$\xi_4$	$R_m$ ( $\Omega$ )	$K_{int}$ ( $Pa.s^2.mol^{-2}$ )
-1,2668	$9,7.10^{-3}$	$4,4558.10^{-4}$	$-8,763.10^{-5}$	$3,1.10^{-3}$	$9,26.10^6$

Une observation majeure doit être signalée concernant la résistance ohmique. En effet, elle représente globalement la résistance au transfert des protons à travers la membrane de même qu'au transfert des électrons à travers les électrodes et les plaques collectrices. En outre, en travaillant avec de faibles densités de courant,  $j_{PAC}$ , comparées aux densités maximales autorisées



par le constructeur de pile,  $j_{max}$ , la valeur de la chute de tension de diffusion ou de concentration,  $\eta_{con}$ , généralement exprimée par l'équation 2.40, peut être approximée par l'équation 2.41 :

$$\eta_{con} = -B \cdot \ln \left( 1 - \frac{j_{PAC}}{j_{max}} \right) \quad (2.40)$$

$$\eta_{con} = B \frac{j_{PAC}}{j_{max}} = \beta I_{PAC} \quad (2.41)$$

La chute de tension de concentration est ainsi prise en compte dans l'équation de tension dans laquelle le terme  $\beta$  est inclus dans la valeur de la résistance ohmique identifiée,  $R_m$ . A noter que d'autres travaux similaires [CFCS04] traitent à part chaque terme de la résistance ohmique ce qui nécessite la connaissance de certaines grandeurs spécifiques au type de membrane utilisée telle sa résistivité ou son épaisseur. Nous avons adopté, en revanche, une approche orientée commande ou, en d'autres termes, un point de vue macroscopique nous permettant d'adapter le modèle à différents types et tailles de piles.

### 2.3.2.5 Validation expérimentale

La figure 2.4 montre la tension de la pile donnée par le modèle comparée à la tension mesurée en régime statique. La phase suivante est de tester la validité du modèle en réponse à des sollicitations dynamiques de puissance ainsi que pour différents nombres de cellules et donc de facteurs d'échelle. Dans cette perspective, un essai dynamique de suivi de cycle sur une pile de 3 cellules du même type est utilisé. Au cours de cet essai, la pile à combustible est soumise à un profil courant/temps spécifique, montré dans la figure 2.5, issu de mesures récupérées sur un parcours d'un véhicule sur un cycle d'usage réel en milieu urbain [Jea01] [And] après avoir procédé à une homothétie sur la puissance afin de la rendre compatible avec la pile testée.

Afin de tenir compte des phénomènes négligés dans l'estimation de la chute de pression à l'intérieur de la pile, un facteur de correction de 10% a été ajouté à la pression partielle d'oxygène. Nous obtenons le même effet en modifiant le paramètre correspondant,  $\xi_3$  dans l'expression de tension comme adopté dans [CFCS04].

En outre, une modification nécessaire est apportée au modèle de tension pour tenir compte du régime dynamique en intégrant l'effet de la capacité de double couche due à la formation de

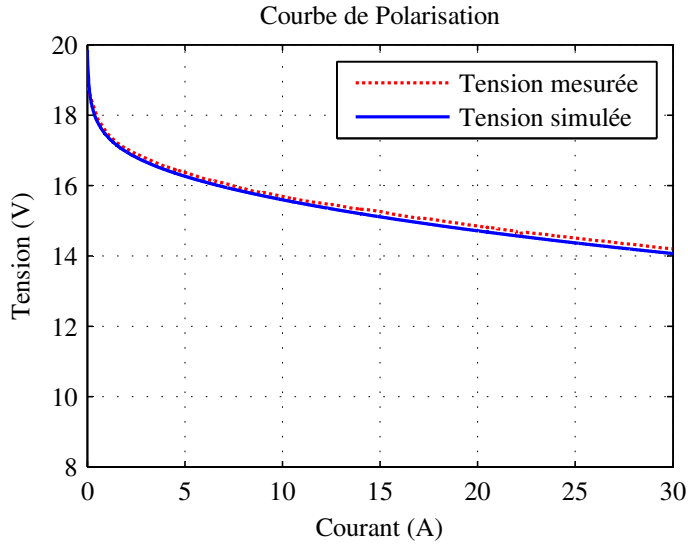


FIG. 2.4 – Courbes de tension mesurée et simulée pour une pile de 20 cellules en régime statique

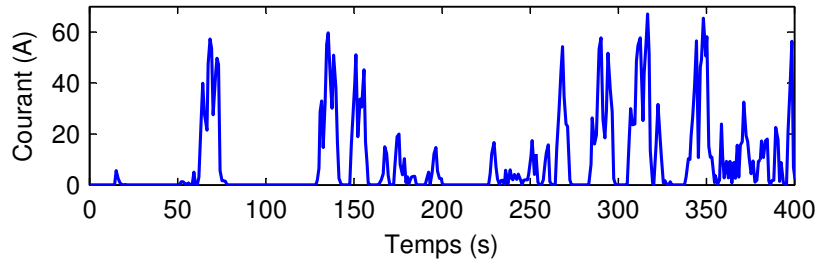


FIG. 2.5 – Profil de mission pour véhicule en milieu urbain après homothétie

deux couches de charges de polarités opposées à la frontière séparant la cathode et la membrane [LD03]. Ces couches peuvent emmagasiner de l'énergie électrique empêchant ainsi toute variation brusque de tension pour une variation rapide de courant. Dans ce contexte, un filtre du premier ordre est ajouté à la surtension d'activation. En première approche, une constante de temps fixe de 1 rad/s est utilisée. Une bande passante dynamique est par suite implantée suivant les équations 2.42 et 2.43 [CFG03].

$$\frac{dv_d}{dt} = \frac{1}{\tau}v_d - \frac{1}{C}I_{PAC} \quad (2.42)$$

$$\tau = -C \cdot \frac{\eta_{act}}{I_{PAC}} \quad (2.43)$$

Où  $v_d$  représente la tension dynamique qui vient remplacer la tension d'activation,  $\eta_{act}$ , dans

l'expression de la tension,  $C$  est la capacité équivalente approximée à 0,1 F et  $\tau$  la constante de temps électrique de la pile.

La figure 2.6 représente la réponse en tension du modèle observée sur deux intervalles différents de temps, avec l'utilisation du filtre de bande passante fixe, BPF, et dynamique, BPD, tout en comparant ces tensions simulées à la tension mesurée expérimentalement, TME. L'effet amortisseur de la capacité de double couche est clairement observé sur la réponse en tension dans cette figure notamment sur les parties du cycle où le courant subit une brusque chute.

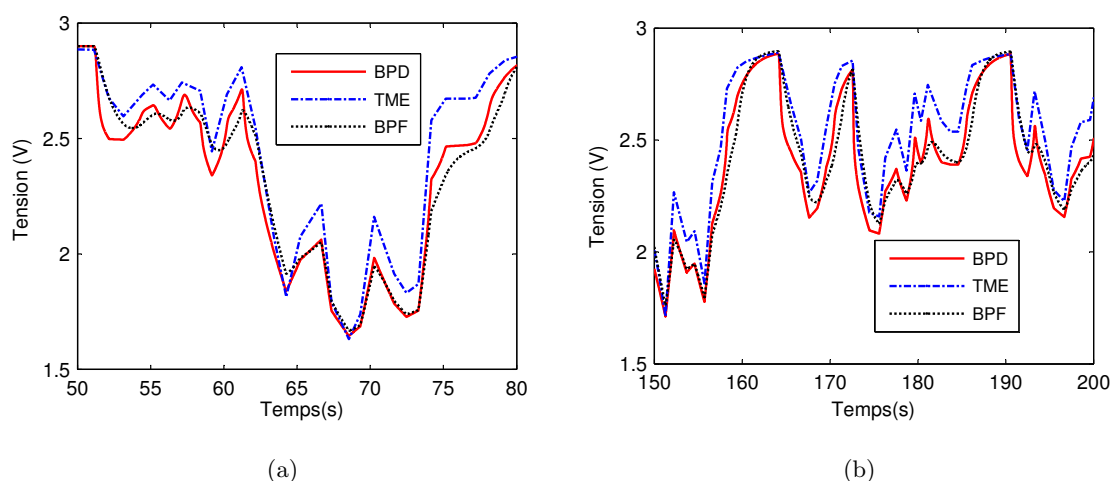


FIG. 2.6 – Réponse en tension du modèle et réponse expérimentale à une sollicitation en courant observée sur deux intervalles différents du temps de cycle complet. BPF : filtre de bande passante fixe, BPD : bande passante dynamique, TME : tension mesurée expérimentalement

En résumé, nous avons présenté dans cette partie, un modèle simple pour la simulation de la tension de la pile à combustible en régime statique et dynamique. Nous nous sommes basés dans ce travail sur un modèle semi empirique d'une cellule de pile [ABM<sup>+</sup>95], sur des travaux précédents de modélisation et de commande d'un système de pile [CLF<sup>+</sup>05] [LFC<sup>+</sup>03] ainsi que sur des travaux de recherches similaires [CFGS03] [CFCS04] et enfin sur des observations expérimentales [HCF<sup>+</sup>05] [HFJM03]. Ce modèle va nous servir pour exprimer le rendement de la pile à combustible en fonction du courant et donc de la puissance débitée vu que ce rendement est proportionnel à la tension comme déjà présentée dans l'équation 2.11. Dans ce qui suit, nous allons caractériser les pertes dans le compresseur d'air et le hacheur survolteur afin de modéliser

les pertes totales du groupe électrogène.

## 2.4 Puissance absorbée par le compresseur d'air

Dans ce paragraphe, nous allons présenter l'expression utilisée dans l'estimation de la puissance électrique absorbée par le moteur du compresseur d'air,  $P_{comp}$ , afin de caractériser l'expression du rendement,  $\eta_{comp}$ , représenté dans l'équation 2.7.  $P_{comp}$  est donnée par l'équation suivante [LD03] :

$$P_{comp} = \frac{Cp \cdot Te}{\eta_m \cdot \eta_c} \left( \left( \frac{P_{cath}}{P_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \times F_{air\_en} \quad (2.44)$$

Avec :

$P_{comp}$  : La puissance absorbée par le compresseur d'air en W.

$Cp$  : La capacité thermique massique de l'air. Elle est égale à  $1004 J.K^{-1}.Kg^{-1}$ .

$Te$  : La température d'entrée de l'air en K.

$\eta_m$  : Le rendement du moteur du compresseur.

$\eta_c$  : Le rendement isentropique du compresseur.

$P_{cath}$  : La pression en aval du compresseur.

$P_{atm}$  : La pression en amont du compresseur, égale à la pression atmosphérique.

$\gamma$  : Le rapport des capacités thermiques de l'air, égal à 1,4

$F_{air\_en}$  : Le débit massique d'air à la sortie du compresseur en kg/s.

Le rendement isentropique du compresseur,  $\eta_c$ , est le rapport entre le travail de compression réel nécessaire à l'élévation de la pression  $P_{atm}$  à la pression  $P_{cath}$  et le travail isentropique qui serait effectué si le processus était isentropique ou réversible. Il tient compte ainsi de l'élévation de température due aux frottements internes du fluide dans la machine, des fuites internes d'air ou des pertes de charge. Il existe aussi des pertes mécaniques externes dues à l'entraînement du compresseur et aux paliers du rotor. Le rendement isentropique est généralement tabulé ou cartographié dans les fiches techniques en fonction du rapport des pressions, du facteur de vitesse du rotor et du facteur de débit massique [LD03]. Un rendement fixe de 70% est une bonne estimation dans le cas de notre application [Tek04].

En ce qui concerne le rendement du moteur du compresseur, la figure 2.7 illustre la variation d'un rendement typique d'un moteur alternatif, en fonction de la puissance utile du moteur,  $P_u$ , rapportée à la puissance nominale,  $P_m$ .

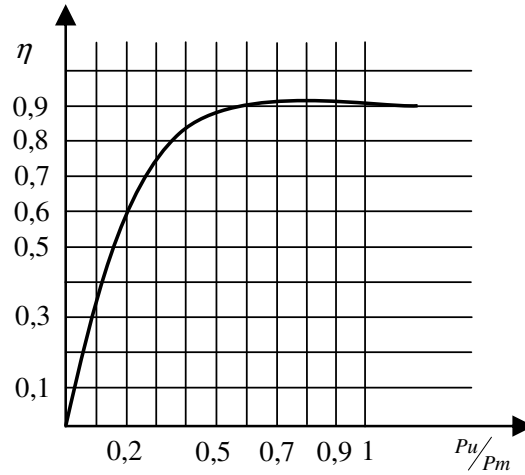


FIG. 2.7 – courbe du rendement d'un moteur alternatif en fonction de sa puissance utile rapportée à la puissance nominale

Le débit massique d'air,  $F_{air\_en}$ , est donné par l'équation suivante :

$$F_{air\_en} = St_{O_2} \cdot M_{air} \cdot \frac{N_{cell} \cdot I_{PAC}}{4X_{O_2} \cdot F} \quad (2.45)$$

Où  $St_{O_2}$  est le rapport stoechiométrique ou le rapport entre le débit entrant et le débit consommé,  $M_{air}$  est la masse molaire de l'air égale à  $29.10^{-3} \text{ kg.mol}^{-1}$ ,  $N_{cell}$  le nombre de cellules élémentaires de la pile,  $X_{O_2}$  est la fraction molaire de l'oxygène dans l'air, égale à 0,21 et  $F$  la constante de Faraday, égale à  $96484,6 \text{ C.mol}^{-1}$ .

## 2.5 Pertes dans le hacheur survolteur

Nous allons au cours de cette section, présenter le modèle de calcul de pertes dans le hacheur survolteur afin de caractériser l'expression du rendement  $\eta_{hach}$  en fonction de la puissance bus  $P_{PAC\_bus\_brut}$  selon l'équation 2.6. Le schéma bloc du modèle de pertes est présenté dans la figure 2.8.

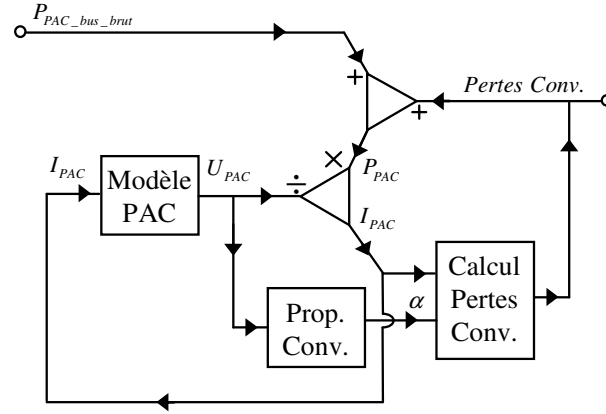


FIG. 2.8 – Bloc de calcul des pertes du hacheur survolteur

Le bloc de calcul des pertes du hacheur exprime les pertes du convertisseur,  $Pertes_{hach}$ , en fonction du courant,  $I_{PAC}$ , et du rapport cyclique,  $\alpha$  :

$$Pertes_{hach} = f(I_{PAC}, \alpha) \quad (2.46)$$

Or  $\alpha$  est exprimé en fonction de la tension en amont du convertisseur,  $U_{PAC}$ , et de la tension en aval,  $V_{bus}$  d'après la caractéristique même du hacheur survolteur suivant l'équation 2.47 :

$$U_{PAC} = V_{bus}(1 - \alpha) \quad (2.47)$$

Cela dit, les pertes du hacheur sont ainsi exprimées en fonction du courant et de la tension de la pile à combustible :

$$Pertes_{hach} = g(I_{PAC}, U_{PAC}) \quad (2.48)$$

D'autre part, la tension de la pile est reliée au courant d'après le modèle de pile en régime statique présenté dans la partie précédente. Ainsi pour une puissance de pile donnée  $P_{PAC}$ , nous avons un couple de tension et courant correspondants ce qui nous permet de calculer les pertes du hacheur en fonction de cette puissance et du fait en fonction de la puissance de bus,  $P_{PAC\_bus\_brut}$  vu que  $P_{PAC\_bus\_brut} = P_{PAC} - Pertes_{hach}$ .

Dans ce qui suit nous allons présenter l'expression utilisée pour le calcul des pertes du hacheur en fonction du courant et du rapport cyclique (équation 2.46)

### 2.5.1 Expression des pertes énergétiques dans le hacheur

Le schéma équivalent du hacheur survolteur met en évidence une cellule de commutation formée d'un transistor de type IGBT et d'une diode comme montré dans la figure 2.9. Dans le cas du hacheur réversible en courant, la cellule de commutation est formée de deux transistors IGBT associés à deux diodes de roue libre. Cette structure lui permet d'être réversible en courant pour pouvoir transmettre le courant à la charge dans le cas de la décharge de l'élément de stockage ou d'absorber le courant à partir de la charge ou de la pile dans le cas de la charge de l'élément de stockage. Or dans chacune de ces deux phases de fonctionnement de ce hacheur, uniquement un des deux IGBT avec une des diodes sont mis en oeuvre (figure 2.9). Ce qui fait que le calcul des pertes en puissance dans les deux structures de hacheurs revient à calculer les pertes dans un IGBT en commutation avec une diode.

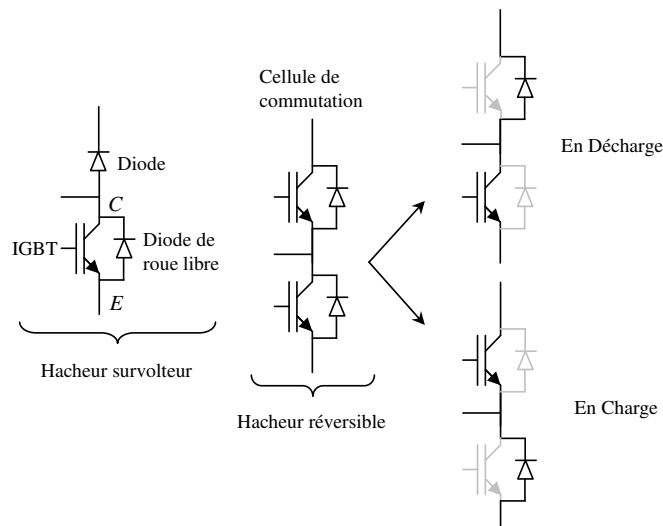


FIG. 2.9 – Schéma électronique d'une cellule de commutation

Les pertes de puissances totales du hacheur,  $P_{hach}$ , sont donc la somme des pertes totales des IGBTs,  $P_{IGBT\_tot}$ , et des diodes,  $P_{diode\_tot}$ , qui forment la cellule de commutation de ce hacheur sachant que plusieurs IGBT et diodes correspondantes peuvent être mis en parallèle pour tenir compte du courant demandé dans l'application considérée comme montré dans la figure 2.10.

Dans notre cas, le nombre d'éléments en parallèles,  $N$  est pris égal à 1 en choisissant l'IGBT adapté au courant maximal débité par la pile. Les pertes dans ces semi-conducteurs de puissance

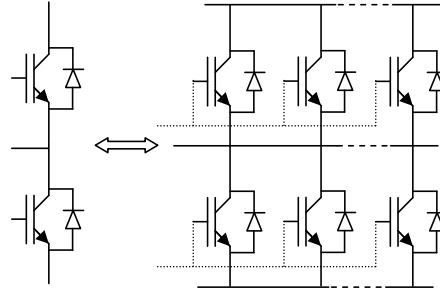


FIG. 2.10 – Mise en parallèle de plusieurs IGBT

sont dissociées en fonction des phases de conduction et de commutation des IGBTs :

$$P_{hach} = P_{diode\_tot} + P_{IGBT\_tot} = N (P_{diode} + P_{IGBT}) \quad (2.49)$$

$$P_{hach} = N (P_{diode\_cond} + P_{IGBT\_cond} + P_{IGBT\_com}) \quad (2.50)$$

$P_{IGBT\_cond}$  et  $P_{IGBT\_com}$  sont respectivement les pertes en conduction et en commutation dans l'IGBT.  $P_{diode\_cond}$  sont les pertes en conduction dans la diode en négligeant les pertes par commutation.

### 2.5.1.1 Pertes en conduction

Les pertes en conduction sont dues à la présence d'une tension de saturation non nulle dans la diode et l'IGBT lorsque ceux ci conduisent. En effet, l'expression de la tension entre le collecteur et l'émetteur d'un transistor (IGBT) lorsqu'il conduit (donnée dans l'équation 2.51) permet de déterminer l'expression analytique des pertes de puissances en conduction engendrées par ce dernier comme présentée dans l'équation 2.52

$$v_{CE} = v_{CE_0} + R_T \cdot I_C \quad (2.51)$$

$$P_{IGBT\_cond} = v_{CE_0} \cdot \bar{I}_T + R_T \cdot I_{T\_eff}^2 \quad (2.52)$$

$\bar{I}_T$  et  $I_{T\_eff}$  sont respectivement les valeurs moyenne et efficace du courant circulant à travers le transistor. La tension de seuil du transistor,  $v_{CE_0}$ , ainsi que sa résistance série,  $R_T$ , proviennent de la caractéristique à 125 °C de la tension de sortie du transistor fournie par le constructeur :  $v_{CE} = f(I_C)$  comme montré dans la figure 2.11(a) dans le cas d'un IGBT de



tension et courant maximaux de 600V et 600 A, choisi à titre de référence [Pow].

Une formule équivalente est appliquée dans le cas de la diode :

$$P_{diode\_cond} = v_{D_0} \cdot \bar{I}_D + R_D \cdot I_{D\_eff}^2 \quad (2.53)$$

Où  $\bar{I}_D$  et  $I_{D\_eff}$  sont respectivement les valeurs moyenne et efficace du courant circulant à travers la diode.  $v_{D_0}$  et  $R_D$  sont déterminés grâce à la caractéristique à 125 °C de la tension de sortie de la diode  $v_F = f(I_F)$  comme montré dans la figure 2.11(b). Les valeurs des tensions de seuil et des résistances séries obtenues pour le module choisi sont groupées dans le tableau 2.3

TAB. 2.3 – Caractéristiques de l'IGBT utilisé dans le calcul des pertes par commutation

$v_{CE_0}$ (V)	$R_T$ ( $\Omega$ )	$v_{D_0}$ (V)	$R_D$ ( $\Omega$ )
1	0,0022	0,8	0,0023

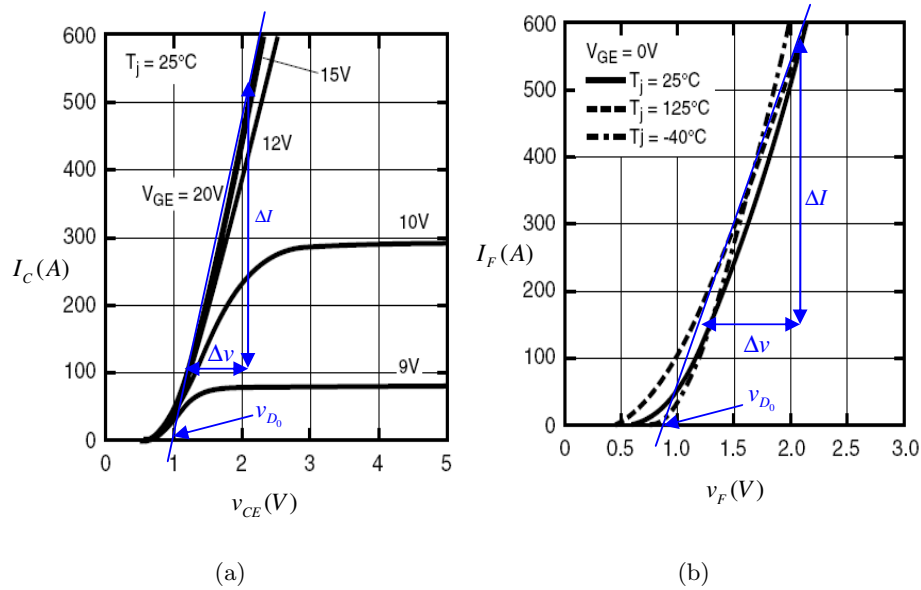


FIG. 2.11 – Caractéristiques de tension de sortie de (a) l'IGBT et (b) la diode

### 2.5.1.2 Pertes par commutation

Lors de l'amorçage ou du blocage d'un IGBT, le courant et la tension ne changent pas instantanément comme représenté idéalement dans la figure 2.12 ce qui engendre une énergie perdue à

l'amorçage,  $E_{on}$ , et au blocage,  $E_{off}$ , durant chaque période de découpage  $T_c$ . Une énergie supplémentaire, souvent appelée énergie de recouvrement,  $E_{rec}$ , est dissipée lors des commutations. Elle est due au courant inverse qui circule dans la diode lorsqu'elle se bloque spontanément en raison de l'amorçage commandé de l'IGBT opposé. Ce courant appelé « Reverse Recovery current » circule dans l'IGBT alors que celui ci est en train de s'amorcer, la tension,  $v_{CE}$ , étant non nulle.

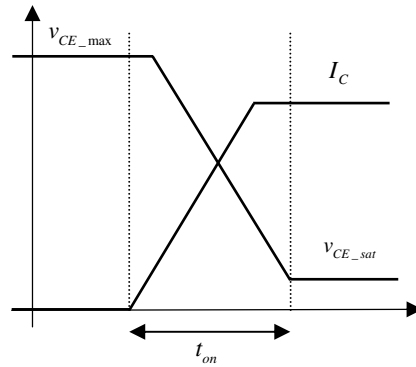


FIG. 2.12 – Phase de commutation (amorçage) idéalisée d'un transistor

L'énergie totale perdue en commutation,  $E_{com}$ , sur une période de découpage,  $T_d$  est donc :

$$E_{com} = E_{on} + E_{off} + E_{rec} \quad (2.54)$$

La puissance moyenne dissipée en commutation,  $P_{IGBT\_com}$ , est alors proportionnelle à la fréquence de découpage,  $f_d (= 1/t_d)$  comme suit :

$$P_{IGBT\_com} = f_d \cdot E_{com} = f_d \cdot (E_{on} + E_{off} + E_{rec}) \quad (2.55)$$

Pour la commutation du transistor, la fiche technique du constructeur fournit les caractéristiques à  $125^\circ C$  de l'énergie consommée au blocage et à l'amorçage en fonction du courant commuté,  $I_C$  pour une tension commutée de référence,  $v_{ref}$ , ainsi que l'énergie de recouvrement de la diode antiparallèle en fonction du courant traversant la diode,  $I_F$ , comme montré dans la figure 2.13 [Pow].

Une loi de proportionnalité est utilisée pour tenir compte de la valeur réelle de la tension

commutée, dans notre cas  $V_{bus}$ , comme suit :

$$E_{com\_V_{bus}} = \frac{V_{bus}}{v_{ref}} \cdot E_{com\_v_{ref}} \quad (2.56)$$

Les courbes du constructeur pour chacune de ces énergies sont ensuite approchées par une expression polynomiale en fonction des courants commutés suivant les équations :

$$E_{on} = a_{on}I_{ton}^3 + b_{on}I_{ton}^2 + c_{on}I_{ton} + d_{on} \quad (2.57)$$

$$E_{off} = a_{off}I_{toff}^3 + b_{off}I_{toff}^2 + c_{off}I_{toff} + d_{off} \quad (2.58)$$

$$E_{rec} = a_{rec}I_{rr}^3 + b_{rec}I_{rr}^2 + c_{rec}I_{rr} + d_{rec} \quad (2.59)$$

Les coefficients des polynômes trouvés sont groupés dans le tableau 2.4 et ceci pour l'IGBT choisi à titre de référence.

TAB. 2.4 – Coefficients des polynômes des expressions de  $E_{on}$ ,  $E_{off}$  et  $E_{rec}$

	$E_{on}$	$E_{off}$	$E_{rec}$
a	$1,6686 \cdot 10^{-8}$	$3,464 \cdot 10^{-7}$	$5,3726 \cdot 10^{-8}$
b	$-1,4084 \cdot 10^{-5}$	$-2,1333 \cdot 10^{-4}$	$-6,7205 \cdot 10^{-5}$
c	0,0687	0,1031	0,0312
d	0,02756	-0,2715	-0,1524

La dernière étape de calcul des pertes du convertisseur est de déterminer les différentes expressions des courants mises en jeu dans les équations 2.52, 2.53, 2.57, 2.58 et 2.59 à savoir  $\bar{I}_T$ ,  $I_{T\_eff}$ ,  $\bar{I}_D$ ,  $I_{D\_eff}$ ,  $I_{ton}$ ,  $I_{toff}$  et  $I_{rr}$  qui sont respectivement les valeurs moyenne et efficace du courant circulant à travers le transistor et la diode, les courants circulant dans le transistor lors de l'amorçage et du blocage et enfin le courant dans la diode lors du blocage.

### 2.5.1.3 Calcul des courants mis en jeu dans le fonctionnement du hacheur

Nous allons présenter dans ce paragraphe les expressions de ces courants en fonction du courant débité par la pile,  $I_{PAC}$ , et du rapport cyclique,  $\alpha$ . Ces expressions sont énumérées dans

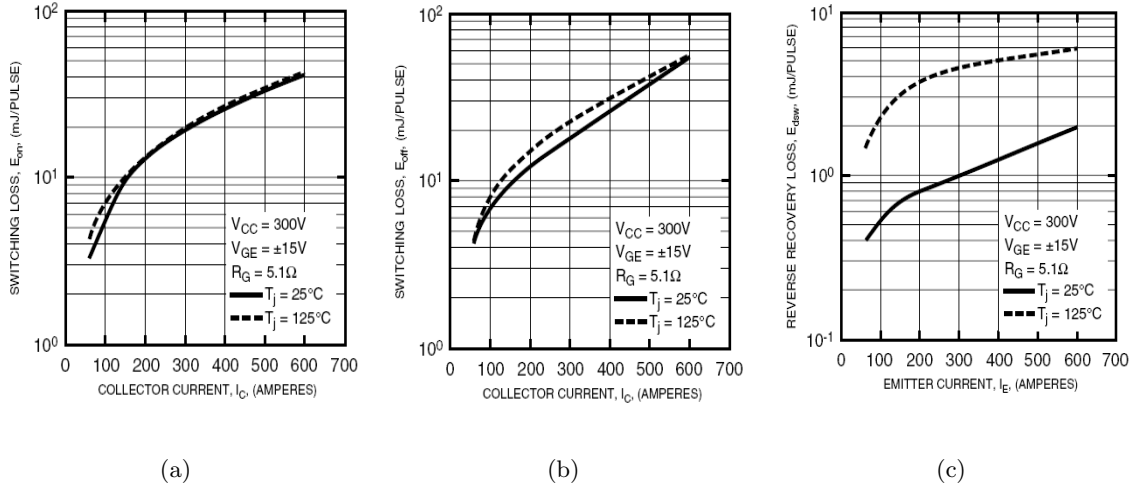


FIG. 2.13 – (a) Energie dissipée lors de l’amorçage de l’IGBT, (b) Energie dissipée lors du blocage, (c) Energie de recouvrement

les équations 2.60 à 2.66 sans entrer dans les détails de calcul qui peuvent être consultés dans des ouvrages dédiés [BLS87], [FF99].

$$\bar{I}_T = \alpha \bar{I}_{PAC} \quad (2.60)$$

$$I_{T\_eff} = \sqrt{\alpha} \sqrt{1 + \frac{\lambda^2}{12} \bar{I}_{PAC}} \quad (2.61)$$

$$\bar{I}_D = (1 - \alpha) \bar{I}_{PAC} \quad (2.62)$$

$$I_{D\_eff} = \sqrt{1 - \alpha} \sqrt{1 + \frac{\lambda^2}{12} \bar{I}_{PAC}} \quad (2.63)$$

$$I_{ton} = \bar{I}_{PAC} - \frac{\Delta I_L}{2} \quad (2.64)$$

$$I_{toff} = \left( \bar{I}_{PAC} + \frac{\Delta I_L}{2} \right) \quad (2.65)$$

$$I_{rr} = \left( \bar{I}_{PAC} - \frac{\Delta I_L}{2} \right) \quad (2.66)$$

$$\lambda = \frac{\Delta I_L}{\bar{I}_{PAC}} \quad (2.67)$$

$$\Delta I_L = \alpha (1 - \alpha) \frac{V_{bus}}{L \cdot f d} \quad (2.68)$$

## 2.6 Résultats de la modélisation du rendement du groupe électrogène

Un modèle de calcul du rendement total du groupe électrogène regroupe et relie les trois blocs essentiels déjà exposés, à savoir le bloc de modélisation de la pile, le bloc de calcul de la puissance absorbée par le compresseur d'air ainsi que le bloc de calcul des pertes du hacheur survolteur. Ce modèle, implanté sous Matlab Simulink, calcule le rendement total du groupe,  $\eta_{GEPAC}$ , en fonction de la puissance au niveau du bus continu,  $P_{PAC\_bus}$ , comme représenté dans le schéma bloc de la figure 2.14.

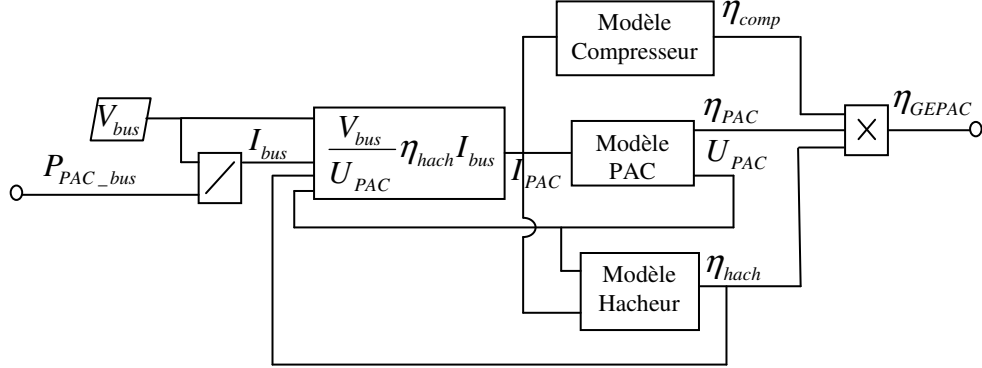


FIG. 2.14 – Modèle de calcul du rendement total du groupe électrogène

Nous allons au cours de ce paragraphe exposer les courbes de rendement des différents blocs obtenues en simulation. Le rendement énergétique de la pile à combustible,  $\eta_{PAC}$ , exposé dans le paragraphe 2.3, est montré dans la figure 2.15(a) en fonction de la puissance débitée par la pile,  $P_{PAC}$ . Ce rendement théorique de la pile met en évidence la proportionnalité entre le rendement de la pile et sa tension qui sont inversement proportionnels au courant demandé et donc à la puissance débitée par la pile. La figure 2.15(b) montre la puissance absorbée par le compresseur d'air,  $P_{comp}$ , dans le cas de notre application, calculé dans le paragraphe 2.4. Cette

puissance perdue caractérise un rendement que nous avons appelé,  $\eta_{Comp}$ , d'après l'équation 2.7.

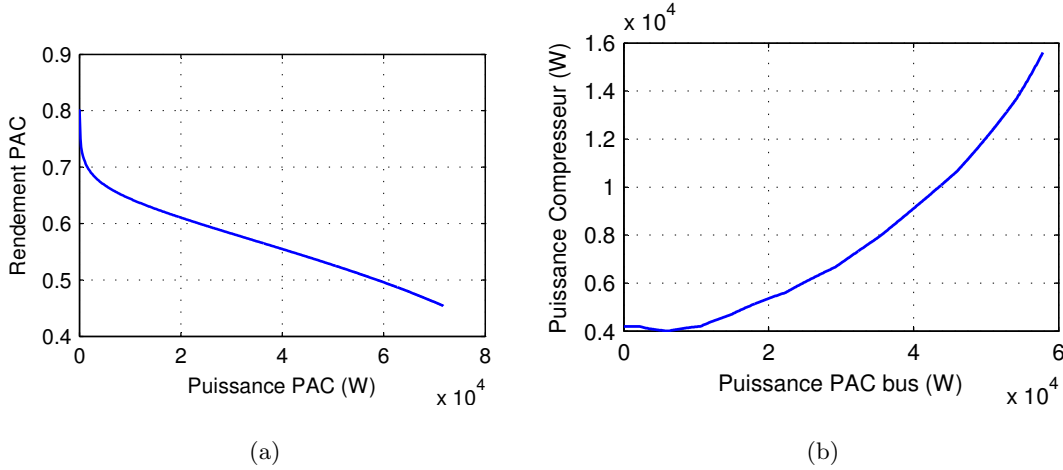


FIG. 2.15 – (a) Rendement énergétique théorique de la pile en combustible, (b) Puissance absorbée par le compresseur d'air

La figure 2.16(a) montre les pertes en puissance du hacheur survolteur calculées pour un type de composants choisis (paragraphe 2.5). Ces pertes augmentent avec la fréquence de découpage comme montré dans cette figure avec deux fréquences différentes, 2 et 20 kHz. Le rendement du hacheur caractérisé par ces pertes est représenté dans la figure 2.16(b). Ces courbes montrent le rendement assez élevé des hacheurs avec les nouvelles technologies des composants semi-conducteurs utilisés, un rendement qui varie entre 96 et 98 % sur la majorité de la plage de puissance.

Enfin le rendement total du groupe électrogène à pile à combustible est montré dans la figure 2.17. Ce rendement atteint un maximum de 0,46 correspondant à une puissance de 22 kW, à 30% de la puissance maximale de la pile égale à 70 kW.

Une observation est faite concernant la variation du rendement global de la pile en fonction de la pression partielle d'oxygène. En effet, la tension de la pile à combustible dépend de plusieurs éléments notamment de la pression partielle d'oxygène,  $P_{O_2}$ , comme exprimé dans l'équation 2.12. En augmentant la pression dans le compartiment cathodique, la tension de la pile augmente et par suite le rendement de la pile s'améliore. Cela peut être observé dans la figure 2.18(a) dans laquelle le rendement de la pile est exprimé pour des pressions cathodiques allant de 1,1 bars à 2 bars. Or en augmentant la pression cathodique, la puissance absorbée par le compresseur d'air, calculée d'après l'équation 2.44 augmente ce qui diminue le rendement dû au compresseur

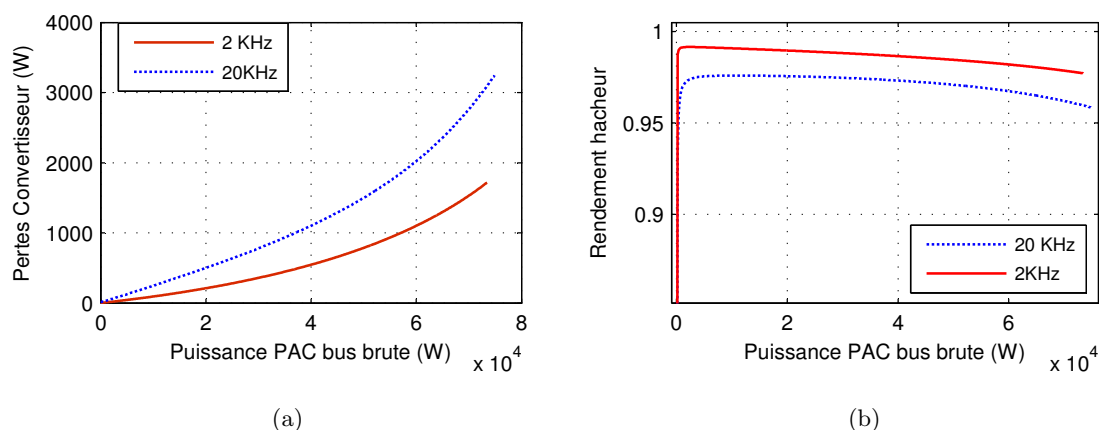


FIG. 2.16 – (a) Pertes de puissances dans le hacheur survolteur pour deux valeurs différentes de fréquence de découpage, (b) Rendement de ce hacheur en fonction de la puissance bus brute.

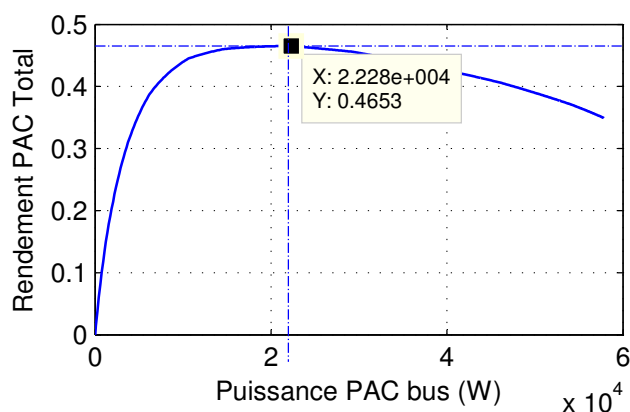


FIG. 2.17 – Rendement total du groupe électrogène en fonction de la puissance PAC bus

comme montré dans la figure 2.18(b). Compte tenu de ces deux variations antagonistes, le groupe électrogène aura un meilleur rendement global pour une valeur moyenne de pression cathodique d'environ 1,2 bars comme montré dans la figure 2.18(c).

## 2.7 Pertes totales dans l'élément de stockage

Le rendement du groupe électrogène étant caractérisé, nous allons traiter dans cette section les pertes totales dans l'élément de stockage. Cet élément est formé du pack de supercondensateurs et du hacheur réversible en courant. Le bilan énergétique de cet élément est montré dans la figure 2.19. A partir de ce bilan, nous distinguons les pertes du hacheur survolteur,  $Pertes_{hach}$ ,

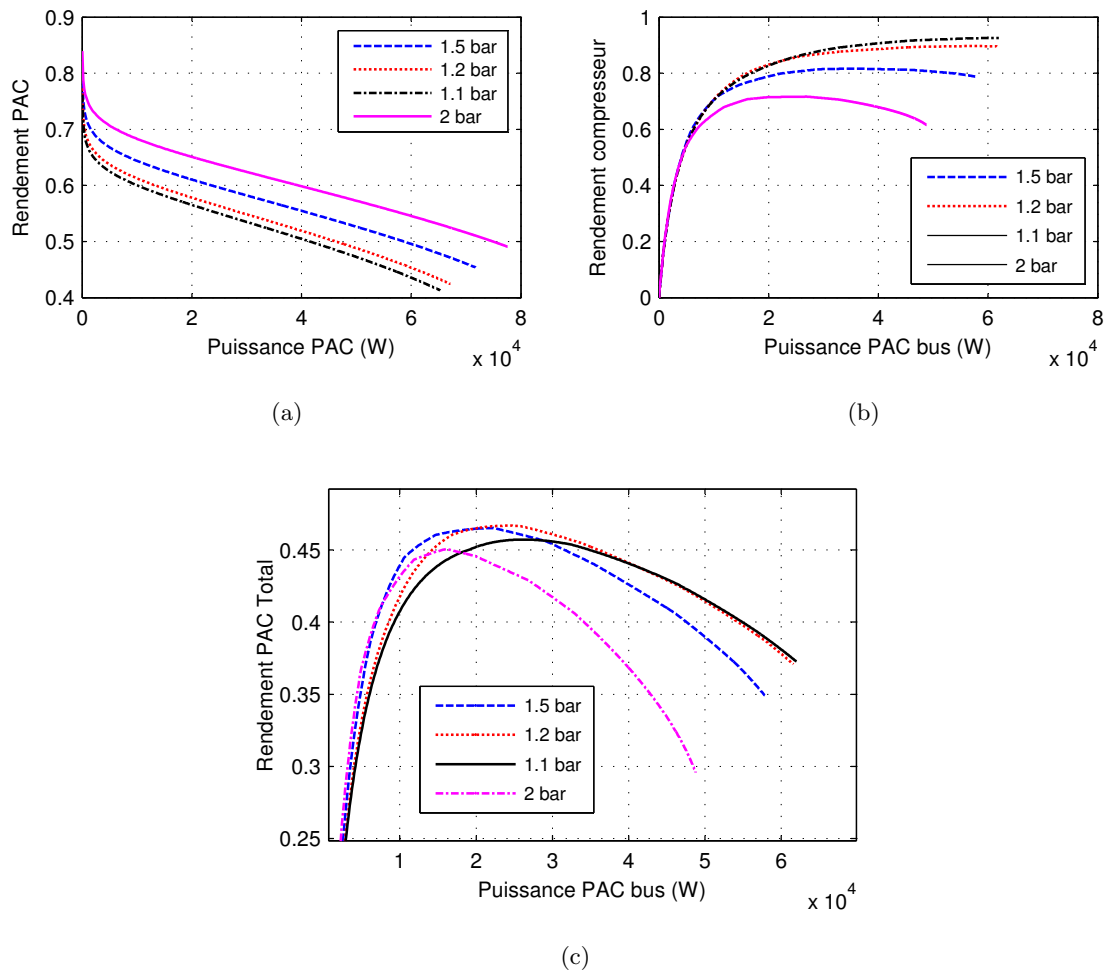


FIG. 2.18 – Variation du rendement en fonction de la pression partielle d'oxygène : (a) Rendement de la pile à combustible, (b) Rendement de compression d'air, (c) Rendement total du groupe électrogène.



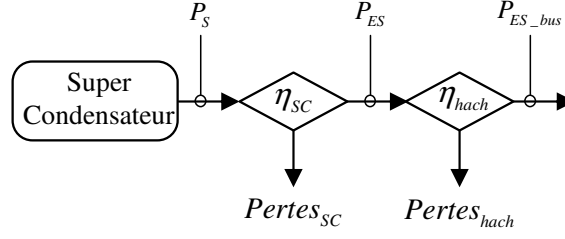


FIG. 2.19 – Bilan énergétique de l'élément de stockage

et les pertes dans les supercondensateurs,  $Pertes_{SC}$ , sur le chemin entre la puissance fournie ou demandée par la charge au niveau du bus continu,  $P_{ES\_bus}$ , et la puissance réellement fournie ou stockée par les supercondensateurs,  $P_S$ .

Les pertes totales dans cet élément de stockage,  $Pertes_{ES}$ , sont ainsi données par l'équation :

$$Pertes_{ES}(P_{ES\_bus}) = Pertes_{SC}(P_{ES\_bus}) + Pertes_{hach}(P_{ES\_bus}) \quad (2.69)$$

Sachant que :

$$P_S = P_{ES} + Pertes_{SC} \quad (2.70)$$

$$P_{ES} = P_{ES\_bus} + Pertes_{hach} \quad (2.71)$$

La convention de signe utilisée dans l'élément de stockage considère que la puissance est positive si elle est fournie par l'élément de stockage à la charge, c'est-à-dire supercondensateurs en décharge, et négative si elle est récupérée pour être stockée dans cet élément, supercondensateurs en charge. Afin de respecter cette convention de signe, les équations précédentes restent valables en charge et en décharge en considérant que les pertes sont toujours prises en valeur absolue. Dans ce cas, les expressions du rendement des supercapacités,  $\eta_{SC}$ , et du hacheur réversible,  $\eta_{hach}$ , sont définies comme suit :

$$\eta_{hach} = \begin{cases} \frac{P_{ES\_bus}}{P_{ES}} & \text{en décharge} \\ \frac{P_{ES}}{P_{ES\_bus}} & \text{en charge} \end{cases} \quad (2.72)$$

$$\eta_{SC} = \begin{cases} \frac{P_{ES}}{P_S} & \text{en décharge} \\ \frac{P_S}{P_{ES}} & \text{en charge} \end{cases} \quad (2.73)$$

### 2.7.1 Pertes dans les supercondensateurs

Le modèle équivalent du pack de supercondensateurs adopté dans notre étude comprend une capacité équivalente,  $C_{SC}$  en série avec une résistance équivalente,  $R_{SC}$ , comme montré dans la figure 1.12. Dans ce cas, nous allons considérer les pertes dans cet élément comme étant les pertes ohmiques dues à sa résistance équivalente d'après l'équation suivante :

$$Pertes_{SC} = R_{SC} \cdot I_{SC\_eff}^2 \quad (2.74)$$

$I_{SC\_eff}$  étant le courant efficace circulant dans le pack durant une période de découpage. Il est exprimé en fonction du courant moyen,  $\bar{I}_{SC}$ , du rapport cyclique,  $\alpha$ , et de l'ondulation du courant,  $\Delta I_{SC}$ , comme suit :

$$I_{SC\_eff} = |\bar{I}_{SC}| \cdot \sqrt{1 + \frac{\lambda^2}{12}} \quad (2.75)$$

$$\lambda = \frac{\Delta I_{SC}}{\bar{I}_{SC}} \quad (2.76)$$

$$\Delta I_{SC} = \frac{1}{L' \cdot fp} \alpha (1 - \alpha) V_{bus} \quad (2.77)$$

### 2.7.2 Pertes dans le hacheur réversible

Le calcul des pertes dans le hacheur réversible suit la même démarche de calcul des pertes du hacheur survolteur en remplaçant la valeur du courant de la pile à combustible,  $\bar{I}_{PAC}$ , utilisée dans les équations précédentes de 2.60 à 2.68 par la valeur absolue du courant circulant dans les supercapacités,  $|\bar{I}_{SC}|$ , ces expressions étant valides en traction et en freinage. Les pertes du hacheur réversible sont ainsi représentées en fonction du courant dans les supercondensateurs,  $\bar{I}_{SC}$ , et de la tension aux bornes du pack  $U_{SC}$ .

### 2.7.3 Limitation du modèle des pertes dans l'élément de stockage

A la différence du bloc de calcul des pertes du groupe électrogène, la relation entre la tension et le courant du pack n'est pas valable en statique. En effet, pour une puissance demandée, donc pour un courant donné, le niveau d'énergie ou de charge de l'élément de stockage passe d'un état  $E_0$  à un état  $E$  donc d'une tension  $V_0$  à une tension  $V$  suivant le temps d'application de cette puissance. La tension aux bornes du pack,  $V_{SC}$ , dépend ainsi de la tension initiale,  $V_{SC_0}$ , et du temps d'application de la puissance ce qui implique que, pour une puissance donnée, plusieurs valeurs de tensions sont possibles et donc plusieurs valeurs de pertes. Cela dit, nous ne pouvons pas obtenir une expression généralisée des pertes totales de l'élément de stockage en fonction d'une valeur de la puissance demandée indépendamment du profil de cette puissance, un profil inconnu a priori. L'utilisation de ce modèle n'est ainsi possible que dans le cas de son intégration dans un modèle de simulation en temps réel de la chaîne de traction en tenant compte de la dynamique du profil de mission. Nous allons donc considérer, dans notre étude, un rendement total fixe de l'élément de stockage égal à 0,93 sur toute la plage de puissance. Cette valeur correspond au maximum de pertes obtenu pour un rapport cyclique de 0,5.

## 2.8 Conclusion

L'étude exposée dans ce chapitre nous a permis de caractériser les chemins de flux énergétique reliant le noeud électrique au stockage de l'énergie chimique dans le réservoir d'hydrogène d'une part et au stockage de l'énergie électrique dans les supercapacités d'autre part. Le lien entre l'énergie électrique demandée et l'énergie stockée dans le réservoir d'hydrogène est l'élément clé dans la minimisation de la consommation d'hydrogène sur un parcours donné.

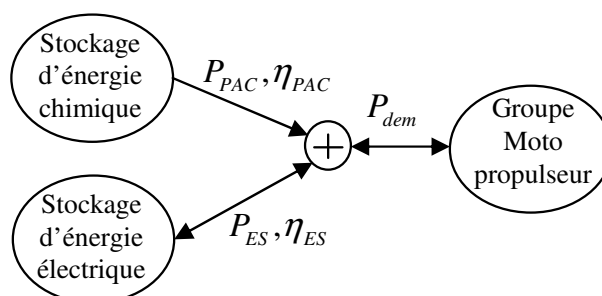


FIG. 2.20 – Modèle énergétique d'un groupe électrogène hybride à pile à combustible

La figure 2.20 représente le modèle abstrait du groupe électrogène hybride à pile à combustible dans lequel chaque chemin est représenté par une valeur de puissance et de rendement. Dans ce schéma,  $P_{PAC}$  représente la puissance utile livrée par la pile ( $P_{PAC\_bus}$ ), et  $P_{ES}$  désigne la puissance  $P_{ES\_bus}$  ; une notation que nous allons adopter au cours des chapitres suivants par soucis de simplification des études. Il faut préciser par là que ce modèle abstrait, orienté commande, est facilement modifiable en un modèle de simulation complet de la chaîne de traction une fois les lois d'optimisation établies en intégrant la dynamique du système en fonction du temps.

# Optimisation Globale de la Distribution de Puissance du Groupe Électrogène Hybride

## 3.1 Introduction

La gestion des échanges de puissance dans la chaîne de traction d'un véhicule hybride est un élément clef dans l'optimisation de la consommation en hydrogène du véhicule. La distribution de puissance entre l'élément de stockage et la pile à combustible assure la demande en puissance électrique du groupe motopropulseur en minimisant autant que possible la consommation d'hydrogène sur un parcours donné tout en respectant les contraintes sur les points de fonctionnement. Ces contraintes sont imposées par la phase de dimensionnement des éléments constitutifs ou résultent des options de conduite ou de maintien de l'état de charge de l'élément de stockage. La consommation d'hydrogène est quantifiée sous forme de fonction de coût à minimiser. Cette fonction est évaluée sur un horizon défini de temps afin de pouvoir quantifier les énergies électriques mises en oeuvre qui peuvent être temporairement stockées pour être utilisées ultérieurement.

Cela dit, le problème de gestion d'énergie peut être formulé comme un problème d'optimisation globale sous contraintes. Nous allons dans cette partie présenter la formulation du problème d'optimisation et aborder des méthodes d'optimisation basées sur la théorie de com-

mande optimale. Cette étude est une adaptation personnalisée des travaux réalisés dans le cas de véhicules hybrides traditionnels, (à moteur de combustion interne) de structure série et parallèle [DLGR04], [LPGK03], [KKdJ<sup>+</sup>05], [BGR00], [BSFF02].

## 3.2 Formulation du problème d'optimisation

Le problème de gestion d'énergie peut être formulé sous forme de problème d'optimisation dynamique dans lequel le système, représenté sous forme d'une équation dynamique 3.1 est contrôlé afin de minimiser un critère coût 3.2 en respectant des contraintes d'égalité 3.3 et des contraintes d'inégalité 3.4 :

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) \quad (3.1)$$

$$\int_{t_i}^{t_f} \gamma(x(t), u(t), t) dt \quad (3.2)$$

$$\psi(x(t), u(t), t) = 0 \quad (3.3)$$

$$\phi(x(t), u(t), t) \leq 0 \quad (3.4)$$

Où  $x(t)$  représente les variables d'état et  $u(t)$  les variables de commande.

### 3.2.1 L'équation dynamique

La variable d'état,  $x$ , considérée dans notre étude du groupe électrogène hybride, est l'état d'énergie de l'élément de stockage  $E(t)$ . En choisissant la puissance fournie ou absorbée par l'élément de stockage,  $P_{ES}(t)$ , comme variable de commande,  $u$ , l'équation 3.1 régissant la dynamique du système est dans ce cas :

$$\dot{E}(t) = -P_S(t) \quad (3.5)$$

$P_S$  est la puissance fournie ou absorbée par les supercondensateurs exprimée en fonction de

la puissance utile,  $P_{ES}$ , et du rendement de l'élément de stockage,  $\eta_{ES}$ , par l'équation suivante :

$$P_S(t) = \begin{cases} \frac{P_{ES}(t)}{\eta_{ES}(P_{ES}(t))} & \text{en décharge} \\ P_{ES}(t) \cdot \eta_{ES}(P_{ES}(t)) & \text{en charge} \end{cases} \quad (3.6)$$

### 3.2.2 Les contraintes

Le dimensionnement des éléments constitutifs du groupe électrogène hybride comme déjà exposé dans la section 1.6.4 impose des limites maximales et minimales sur les puissances échangées et les niveaux d'énergies pouvant être atteints. Ces limites forment les contraintes d'inégalité (équation 3.4) exprimées comme suit :

$$P_{ES\_min} \leq P_{ES}(t) \leq P_{ES\_max} \quad (3.7)$$

$$P_{PAC\_min} \leq P_{PAC}(t) \leq P_{PAC\_max} \quad (3.8)$$

$$E_{min} \leq E(t) \leq E_{max} \quad (3.9)$$

Où  $P_{ES\_max}$  est la puissance maximale que l'élément de stockage peut fournir à un instant donné,  $P_{ES\_min}$  est la puissance négative minimale qui correspond à la puissance maximale (en valeur absolue) que l'élément de stockage peut absorber à un instant donné,  $P_{PAC\_max}$  et  $P_{PAC\_min}$  sont respectivement les puissances minimale et maximale fournies par la pile à combustible et  $E_{max}$  et  $E_{min}$  les états d'énergie maximal et minimal pouvant être atteints par l'élément de stockage comme évoqué dans la partie 1.6.4. Le tableau 3.1 résume les valeurs des limites en puissances et énergies adoptées dans le cas de notre étude.

TAB. 3.1 – Valeurs des limites en puissances et énergies adoptées dans cette étude

$P_{ES\_min}$	$P_{ES\_max}$	$P_{PAC\_min}$	$P_{PAC\_max}$	$E_{min}$	$E_{max}$
-60 kW	60 kW	0 kW	70 kW	400 kW.s	1600 kW.s

D'autre part, le groupe électrogène hybride doit assurer la demande instantanée en puissance du groupe motopropulseur,  $P_{dem}$ , ce qui se traduit évidemment par la contrainte d'égalité

suivante :

$$P_{ES} + P_{PAC} - P_{dem} = 0 \quad (3.10)$$

Enfin une condition supplémentaire est imposée au système afin de garantir le maintien de l'état de charge de l'élément de stockage. A ce propos, nous allons considérer que l'état de charge de cet élément à la fin de l'horizon de temps étudié,  $E(t_f)$ , est égal à son état initial :

$$E(t_f) = E(t_i) \quad (3.11)$$

Cela facilitera l'étude de consommation mais aussi la réutilisation du véhicule sur le même parcours dans les mêmes conditions.

### 3.2.3 Le critère

L'objectif de commande est la minimisation de la consommation de combustible dans un intervalle de temps  $[t_i, t_f]$  sur un profil de mission donné. Ce qui revient à trouver à chaque instant la puissance à demander à l'élément de stockage,  $P_{ES}$ , afin de minimiser l'énergie consommée à partir du réservoir de combustible dans cet intervalle tout en vérifiant les contraintes ainsi évoquées. L'énergie consommée à partir du réservoir de combustible peut être exprimée en fonction de la puissance nette livrée par la pile,  $P_{PAC}$ , et le rendement total du groupe électrogène,  $\eta_{PAC}$ , d'après l'équation suivante :

$$E_{H_2} = \int_{t_i}^{t_f} \frac{P_{PAC}(t)}{\eta_{PAC}(P_{PAC}(t))} dt \quad (3.12)$$

D'après l'équation 3.2, le critère coût dans ce cas s'exprime :

$$\gamma(x(t), u(t), t) = \frac{P_{PAC}(t)}{\eta_{PAC}(P_{PAC}(t))} \quad (3.13)$$

### 3.2.4 Les approches d'optimisation adoptées

La théorie générale de la commande optimale permettant de résoudre ce type de problème d'optimisation dynamique comporte deux majeures formulations, à savoir le principe du maximum de Pontriaguine et le principe de Bellman [Kan04]. Nous allons ainsi aborder au cours de ce chapitre l'application de deux algorithmes de commande optimale, le premier, basé sur le principe de Bellman, est connu sous l'appellation programmation dynamique alors que le second,



basé sur le principe de Pontriaguine, minimise une fonction appelée l'Hamiltonien du système. Bien que le terme de commande optimale englobe les deux méthodes évoquées, il désigne souvent dans les références la seconde méthode ce qui sera adopté dans la suite du travail.

L'application de deux méthodes différentes sert en premier lieu de moyen de comparaison pour validation des résultats obtenus. D'autre part, par le choix de ces deux méthodes, nous avons voulu aborder le problème sous deux approches différentes, la première, la programmation dynamique, tenant compte de variables discrètes pouvant être non convexes, non continues et non différentiables alors que la seconde tient compte de fonctions continues et continuellement différentiables plus ou moins facilement résolues analytiquement ou numériquement. Si l'application de la programmation dynamique passe par une phase de discrétisation de l'espace, la commande optimale adoptée, nécessite, de sa part, l'approximation du critère par une fonction analytiquement différentiable.

### 3.3 Programmation dynamique

La programmation dynamique permet de résoudre un problème pour lequel des décisions doivent être prises étapes par étapes. A chaque étape, les décisions possibles sont évaluées comme étant la somme du coût présent et du coût futur attendu. Cela suppose que le coût futur a déjà été déterminé. La résolution de la programmation dynamique consiste donc en une récurrence inverse dans le temps.

#### 3.3.1 Principe de la méthode

Le modèle de base qui est traité ici présente deux aspects principaux [Ber00] :

- La dynamique du système est décrite sous forme d'une équation dynamique discrétisée.
- La fonction coût est additive en fonction du temps.

Le système de l'équation 3.1 est discrétisé sous la forme :

$$x_{k+1} = f_k(x_k, u_k), \quad k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (3.14)$$

Où  $k$  est l'indice de temps discret,  $x_k$  l'état du système,  $u_k$  la variable de commande ou de décision choisie à l'instant  $k$ ,  $N$  est l'horizon ou le nombre de décisions et  $f_k$  est la fonction décrivant la dynamique du système.

La fonction coût est additive dans le sens que le coût calculé à l'instant  $k$ , et dénoté par  $\gamma_k(x_k, u_k)$ , s'accumule à travers le temps. Le coût total est ainsi donné par :

$$\mathfrak{R} = \gamma_N(x_N) + \sum_{k=0}^{N-1} \gamma_k(x_k, u_k) \quad (3.15)$$

Où  $\gamma_N(x_N)$  est le coût terminal appliqué à la fin du processus.

Une stratégie de commande  $\pi = \{\mu_0, \mu_1, \dots, \mu_{N-1}\}$  est définie en liant à chaque étape  $k$  la commande à appliquer à l'état du système :

$$u_k = \mu_k(x_k) \quad (3.16)$$

Étant donné un état initial  $x_0$  et une stratégie de commande admissible  $\pi = \{\mu_0, \mu_1, \dots, \mu_{N-1}\}$ , alors pour une fonction coût donnée  $\gamma_k$ , de  $k = 0$  à  $N$ , le coût total de la stratégie  $\pi$  est défini par l'équation suivante :

$$\mathfrak{R}_\pi(x_0) = \gamma_N(x_N) + \sum_{k=0}^{N-1} \gamma_k(x_k, u_k) \quad (3.17)$$

La stratégie de commande optimale,  $\pi^*$ , est celle qui minimise ce coût :

$$\mathfrak{R}_{\pi^*}(x_0) = \min_{\pi} (\mathfrak{R}_\pi(x_0)) \quad (3.18)$$

On peut alors considérer ce coût comme une fonction qui, à chaque état initial  $x_0$ , lie la valeur du coût optimal  $\mathfrak{R}_{\pi^*}(x_0)$ . Cette fonction est appelée fonction de coût optimal.

La programmation dynamique s'appuie sur le principe du maximum ou principe de Bellman. Ce principe peut être énoncé comme suit :

Soit  $\pi^* = \{\mu_0^*, \mu_1^*, \dots, \mu_{N-1}^*\}$  une stratégie de commande optimale pour le problème considéré. Supposons que lorsque  $\pi^*$  est utilisée, l'état  $x_i$  est atteint au temps  $i$ . En considérant le sous-problème pour lequel, à partir de l'état  $x_i$ , à l'instant  $i$ , on cherche à minimiser le coût pour aller de  $i$  à  $N$  :  $\mathfrak{R} = \gamma_N(x_N) + \sum_{k=i}^{N-1} \gamma_k(x_k, u_k)$ , alors la stratégie de commande tronquée  $\{\mu_i^*, \mu_{i+1}^*, \dots, \mu_{N-1}^*\}$  est optimale pour ce sous-problème.

De ce principe, nous pouvons formuler que pour chaque état initial  $x_0$ , le coût optimal  $\mathfrak{R}^*(x_0)$  du problème considéré est égal à la valeur de  $\mathfrak{R}_0(x_0)$  donnée par l'algorithme récurrent suivant :

$$\mathfrak{R}_N = \gamma_N(x_N) \quad (3.19)$$

$$\mathfrak{R}_k(x_k) = \min_{u_k} (\gamma_k(x_k, u_k) + \mathfrak{R}_{k+1}(f_k(x_k, u_k))) \quad \text{pour } k = N - 1 \dots 0 \quad (3.20)$$

### 3.3.2 Implantation de l'algorithme

#### 3.3.2.1 Discrétisation de l'espace d'optimisation

L'équation d'état du système utilisée dans l'optimisation 3.5 est discrétisée pour devenir :

$$E_{k+1} = E_k - P_{S_k} \Delta t \quad (3.21)$$

Les différentes contraintes exprimées dans les équations 3.7 à 3.11 sont ainsi après discrétisation :

$$P_{ES\_min} \leq P_{ES_k} \leq P_{ES\_max} \quad (3.22)$$

$$P_{PAC\_min} \leq P_{PAC_k} \leq P_{PAC\_max} \quad (3.23)$$

$$E_{min} \leq E_k \leq E_{max} \quad (3.24)$$

$$P_{PAC_k} + P_{ES_k} = P_{dem_k} \quad (3.25)$$

$$E_0 = E_N \quad (3.26)$$

Et enfin le critère coût (équations 3.12 et 3.13) est exprimé sous forme d'une somme, suivant  $k$ , de coûts instantanés :

$$\mathfrak{R} = \sum_k \gamma_k = \sum_k \frac{P_{PAC_k} \cdot \Delta t}{\eta_{PAC}(P_{PAC_k})} \quad (3.27)$$

Dans l'ensemble de ces équations,  $\Delta t$  représente le pas de temps ou la période d'échantillonnage. Ainsi l'espace de temps est divisé en  $N$  points caractérisants  $N$  étapes d'évaluation de l'algorithme d'optimisation tel que :

$$N = \frac{t_f - t_i}{\Delta t} \quad (3.28)$$

L'espace d'état caractérisé par l'état de charge ou d'énergie  $E$  de l'élément de stockage suivant l'équation 3.1 est divisé en  $M$  points distants d'un pas d'énergie fixé,  $\Delta E$  qui varient entre l'état d'énergie minimal et maximal d'après l'équation 3.24 de telle sorte que :

$$M = \frac{E_{max} - E_{min}}{\Delta E} \quad (3.29)$$

$$E(t) \approx E_{min} + j \cdot \Delta E \quad \text{pour } j = 0, \dots, M \quad (3.30)$$

La discrétisation de l'espace de l'état d'énergie de l'élément de stockage sur un horizon de temps défini est montrée dans la figure 3.1. Cette figure met en évidence deux stratégies de commande,  $\pi$  et  $\pi'$  menant l'état d'énergie de l'élément de stockage d'un état  $E_0$  à l'instant initial représenté par  $k = 0$  à l'état  $E_N$  à l'instant final représenté par  $k = N$  sachant que ces deux états sont choisis égaux afin de satisfaire la contrainte de l'équation 3.26 ; le but de l'algorithme de programmation dynamique étant de trouver la séquence ou la stratégie optimale. L'évolution de l'état d'énergie d'un état  $E_{j_1}$  à un instant  $k$  donné à l'état  $E_{j_2}$  à l'instant  $k + 1$  correspond à une valeur de la variable de commande  $P_s^{j_1, j_2}$  exprimée comme suit :

$$P_s^{j_1, j_2} = - \frac{E_{j_2} - E_{j_1}}{\Delta t} \quad (3.31)$$

Notons le signe négatif qui caractérise l'égalité puisque pour passer d'un état d'énergie élevé à un état plus faible, donc  $\Delta E$  négatif, l'élément de stockage fournit de la puissance électrique ce qui correspond à une puissance  $P_s$  positive selon notre convention de signe.

Cela dit, la démarche suivie pour l'application de l'algorithme de programmation dynamique consiste à trouver la séquence d'évolution optimale  $\pi^*$  de l'état de charge de l'élément de stockage entre l'instant initial ( $k = 0$ ) et l'instant final ( $k = N$ ) de l'intervalle de temps étudié. A partir de cette séquence, la puissance optimale fournie ou absorbée par l'élément de stockage à chaque instant  $k$  est calculée d'après l'équation 3.31. La puissance optimale au niveau du bus

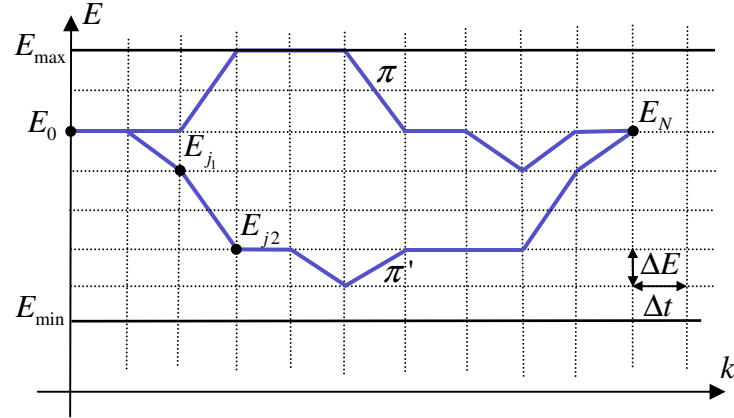


FIG. 3.1 – Maillage de l'espace de l'état d'énergie de l'élément de stockage sur un horizon de temps défini

continu,  $P_{ES_k}^*$ , est ensuite calculée en tenant compte des pertes de l'élément de stockage. Et enfin la séquence de puissance optimale fournie par la pile à combustible,  $P_{PAC_k}^*$ , est trouvée en retranchant  $P_{ES_k}^*$  de la puissance demandée à l'instant  $k$ ,  $P_{dem_k}$ . Dans ce qui suit nous allons procéder au calcul de la séquence d'énergie optimale en appliquant la méthode de programmation dynamique.

### 3.3.2.2 Domaine de validité

Les contraintes évoquées dans les équations 3.22 à 3.26 peuvent être toutes reportées sur le niveau d'énergie  $E$  de l'élément de stockage pour ainsi former un domaine de validité, montré dans la figure 3.2, qui contient toutes les valeurs admissibles pour le choix du niveau d'énergie et donc des pas permis lors de l'application de l'algorithme. Ainsi, à chaque pas de calcul,  $k$ , nous avons des frontières plus strictes définies par  $\hat{E}_{\min}$  et  $\hat{E}_{\max}$  tel que :

$$\hat{E}_{\min}(k) \leq E(k) \leq \hat{E}_{\max}(k) \quad (3.32)$$

$$\hat{E}_{\min}(k) = \max(E_{\min}, E_{\min\_div}(k), E_{\min\_conv}(k)) \quad (3.33)$$

$$\hat{E}_{\max}(k) = \min(E_{\max}, E_{\max\_div}(k), E_{\max\_conv}(k)) \quad (3.34)$$

$E_{\max\_div}$  et  $E_{\min\_div}$ , sont respectivement les limites maximale et minimale de divergence à

partir de l'état de charge initial de l'élément de stockage. Ces grandeurs sont calculées en fonction de la puissance minimale et maximale de l'élément de stockage suivant les équations 3.35 et 3.36. Un état d'énergie  $E(k)$  au delà de  $E_{\max\_div}$  ne peut jamais être atteint en partant de l'état initial  $E(0)$  vu que la puissance qui doit être absorbée à cet effet dépasse la limite inférieure de puissance imposée par les contraintes du système. De même un état d'énergie plus faible que  $E_{\min\_div}$  ne peut être atteint puisque l'élément de stockage devrait fournir une puissance plus élevée que la limite maximale. D'autre part, et partant du même raisonnement,  $E_{\max\_conv}$  et  $E_{\min\_conv}$ , représentent les limites maximale et minimale de convergence de l'état d'énergie vers l'état d'énergie final imposé  $E(N)$  suivant les équations 3.37 et 3.38.

$$E_{\max\_div}(k) = E(0) - \sum_{i=1}^k P_{S\_min}(i) \Delta t \quad (3.35)$$

$$E_{\min\_div}(k) = E(0) - \sum_{i=1}^k P_{S\_max}(i) \Delta t \quad (3.36)$$

$$E_{\max\_conv}(k) = E(N) + \sum_{i=1}^k P_{S\_max}(i) \Delta t \quad (3.37)$$

$$E_{\min\_conv}(k) = E(N) + \sum_{i=1}^k P_{S\_min}(i) \Delta t \quad (3.38)$$

Si les puissances minimale et maximale de l'élément de stockage mises en oeuvre dans ces équations étaient constantes, ces grandeurs énergétiques forment des droites ayant pour pente les valeurs de ces puissances comme schématisé dans la figure 3.2. Or les expressions de  $P_{S\_min}$  et  $P_{S\_max}$  tiennent compte des contraintes de la pile à combustible ramenées à l'élément de stockage et sont ainsi dépendantes du temps ce qui fait que, en réalité, ces droites sont des courbes déformées comme il sera montré ultérieurement dans la partie de simulation. Le calcul de  $P_{S\_min}$  et  $P_{S\_max}$  suit la démarche suivante :

$$P_{S\_min}(i) = P_{ES\_min\_tot}(i) \times \eta_{ES}(P_{ES\_min\_tot}(i)) \quad (3.39)$$

$$P_{S\_max}(i) = \frac{P_{ES\_max\_tot}(i)}{\eta_{ES}(P_{ES\_max\_tot}(i))} \quad (3.40)$$

$P_{ES\_min\_tot}$  et  $P_{ES\_max\_tot}$  sont respectivement les limites inférieure et supérieure totales de l'élément de stockage tenant compte des contraintes propres de l'élément de stockage,  $P_{ES\_min}$

et  $P_{ES\_max}$  (équation 3.22) ainsi que des contraintes de la pile à combustible  $P_{PAC\_min}$  et  $P_{PAC\_max}$  (équation 3.23) ramenées à l'élément de stockage  $P_{ES\_min\_PAC}$  et  $P_{ES\_max\_PAC}$  tel que :

$$P_{ES\_min\_tot}(i) = \max(P_{ES\_min}, P_{ES\_min\_PAC}(i)) \quad (3.41)$$

$$P_{ES\_max\_tot}(i) = \min(P_{ES\_max}, P_{ES\_max\_PAC}(i)) \quad (3.42)$$

$$P_{ES\_min\_PAC}(i) = P_{dem}(i) - P_{PAC\_max} \quad (3.43)$$

$$P_{ES\_max\_PAC}(i) = P_{dem}(i) - P_{PAC\_min} \quad (3.44)$$

Où  $P_{dem}(i)$  représente la puissance demandée par le groupe motopropulseur à un instant  $i$  donné.

Le domaine de validité peut être représenté par un ensemble  $\mathbf{D}$  défini par :

$$\mathbf{D} = \left\{ (k, j) \mid \widehat{E}_{min}(k) \leq E_{min} + j\Delta E \leq \widehat{E}(k) \right\} \quad (3.45)$$

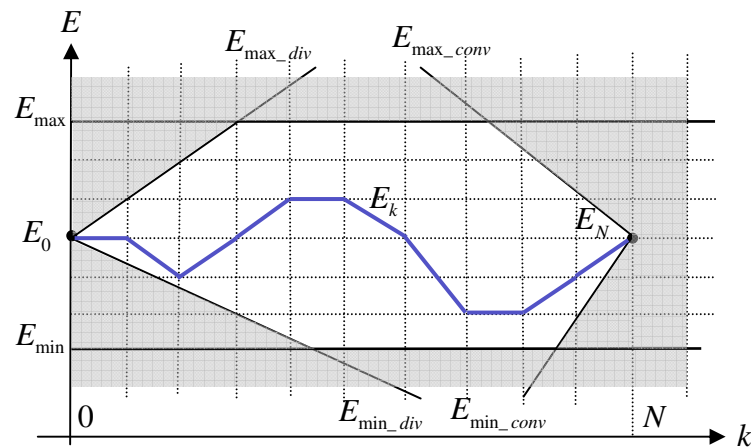


FIG. 3.2 – Domaine de validité de l'état d'énergie de l'élément de stockage

### 3.3.2.3 Algorithme

L'implantation de l'algorithme de programmation dynamique procède par la création d'une matrice coût  $\mathbf{R} \in R^{(M+1) \times N}$ . Le remplissage de cette matrice se fait récursivement en commençant par  $k = N$  et revenant jusqu'à  $k = 1$  en suivant le principe de Bellman. Chaque élément  $(j, k)$  de cette matrice représente le coût optimal pour passer de l'état d'énergie  $E(j)$  à l'instant  $k$  vers l'état final  $E(j_N)$  à l'instant  $N$ . Formellement :

$$\mathbf{R}(j_N, N) = 0 \quad (3.46)$$

$$\mathbf{R}(j, k) = \min_{j, j' \in \mathbf{D}} (\mathbf{R}(j', k+1) + \gamma(k, j, j')) \quad \text{pour } k = N-1, \dots, 1 \quad (3.47)$$

Où  $\gamma(k, j, j')$  représente le coût de passage de l'état  $E_j$  à l'instant  $k$  vers l'état  $E_{j'}$  à l'instant  $k+1$  exprimé en fonction de  $E_j$  et  $E_{j'}$  comme suit :

$$\gamma(k, j, j') = \frac{P_{PAC}(k, j, j') \cdot \Delta t}{\eta_{PAC}(P_{PAC}(k, j, j'))} \quad (3.48)$$

sachant que :

$$P_{PAC}(k, j, j') = P_{dem}(k) - P_{ES}(j, j') \quad (3.49)$$

Tenant compte des pertes de l'élément de stockage :

$$P_{ES}(j, j') = P_S(j, j') - \text{pertes}_{ES}(P_S(j, j')) \quad (3.50)$$

où :

$$P_S(j, j') = \frac{E(j) - E(j')}{\Delta t} \quad (3.51)$$

L'élément  $R(j_0, 1)$  de cette matrice qui correspond à l'état d'énergie initial, contient ainsi la valeur du coût optimal total pour passer de l'état d'énergie  $E_{j_0}$  à l'instant  $k = 0$  vers l'état  $E_{j_N}$  à l'instant  $k = N$ . Notons de plus que cette matrice est une matrice creuse puisque les éléments correspondants à des niveaux d'énergies qui sortent du domaine de validité  $\mathbf{D}$  (équation 3.45) ne sont pas pris en considération. En parallèle à la construction de la matrice coût, une autre matrice de même dimension,  $\mathbf{S}$ , est utilisée afin de stocker l'indice de l'état d'énergie optimal du prochain pas trouvé. Un élément  $S(j, k)$  de cette matrice contient l'indice,  $j'$ , de l'étape suivante qui correspond au trajet optimal partant de l'état  $E(j)$  à l'instant  $k$  vers la fin du cycle. Enfin,



une fois la matrice  $\mathbf{S}$  construite, le trajet optimal, correspondant à la consommation minimale, est donné par un vecteur  $\mathbf{T}$  tel que :

$$\mathbf{T}(1) = E(j_0) \quad (3.52)$$

$$\mathbf{T}(k) = \mathbf{S}(\mathbf{T}(k-1), k-1) \quad \text{pour } k = 2, \dots, N \quad (3.53)$$

Le schéma de la figure 3.3 sert à illustrer la méthode suivie dans l'implantation de l'algorithme de programmation dynamique sur un exemple représentatif d'un nombre limité de points. Enfin la figure 3.4 représente le schéma bloc de cet algorithme qui prend pour entrées la puissance demandée par le groupe motopropulseur à un instant  $t$  donné,  $P_{dem}(t)$ , issu d'un profil de mission d'un véhicule hybride connu a priori ainsi que la valeur du rendement du groupe électrogène  $\eta_{PAC}$  et de l'élément de stockage,  $\eta_{ES}$ , et enfin l'ensemble des contraintes imposées au système afin de calculer la puissance optimale fournie par la pile à combustible à cet instant,  $P_{PAC\_opt}(t)$ , et par l'élément de stockage,  $P_{ES\_opt}(t)$ , de même que le coût final représentant la consommation en hydrogène sur tout le profil de mission étudié.

### 3.3.3 Simulation

Nous allons exposer dans ce qui suit les résultats de l'algorithme de programmation dynamique obtenus en simulation moyennant deux profils de missions différents. Ces deux profils serviront d'évaluation et de comparaison pour tous les algorithmes de commande élaborés dans notre étude. Nous allons commencer dans un premier temps par présenter les deux profils de puissances utilisés avant d'évaluer les résultats de simulation obtenus pour enfin étudier l'effet de variation du pas de discrétisation du temps et de l'état d'énergie sur les performances de l'algorithme.

#### 3.3.3.1 Profils de mission

Les deux profils utilisés dans cette étude représentent la puissance demandée par le groupe motopropulseur en fonction du temps,  $P_{dem}(t)$ . Le premier profil de puissance, fourni par l'INRETS, est récupéré sur le parcours d'un véhicule électrique en milieu urbain [JTB<sup>+</sup>99] [TJB04] alors que le second, fourni par ALSTOM, représente le parcours d'un tramway sur la ligne d'ESKISEHIR en Turquie. Les puissances mises en jeu sont mises à l'échelle afin de les ramener à

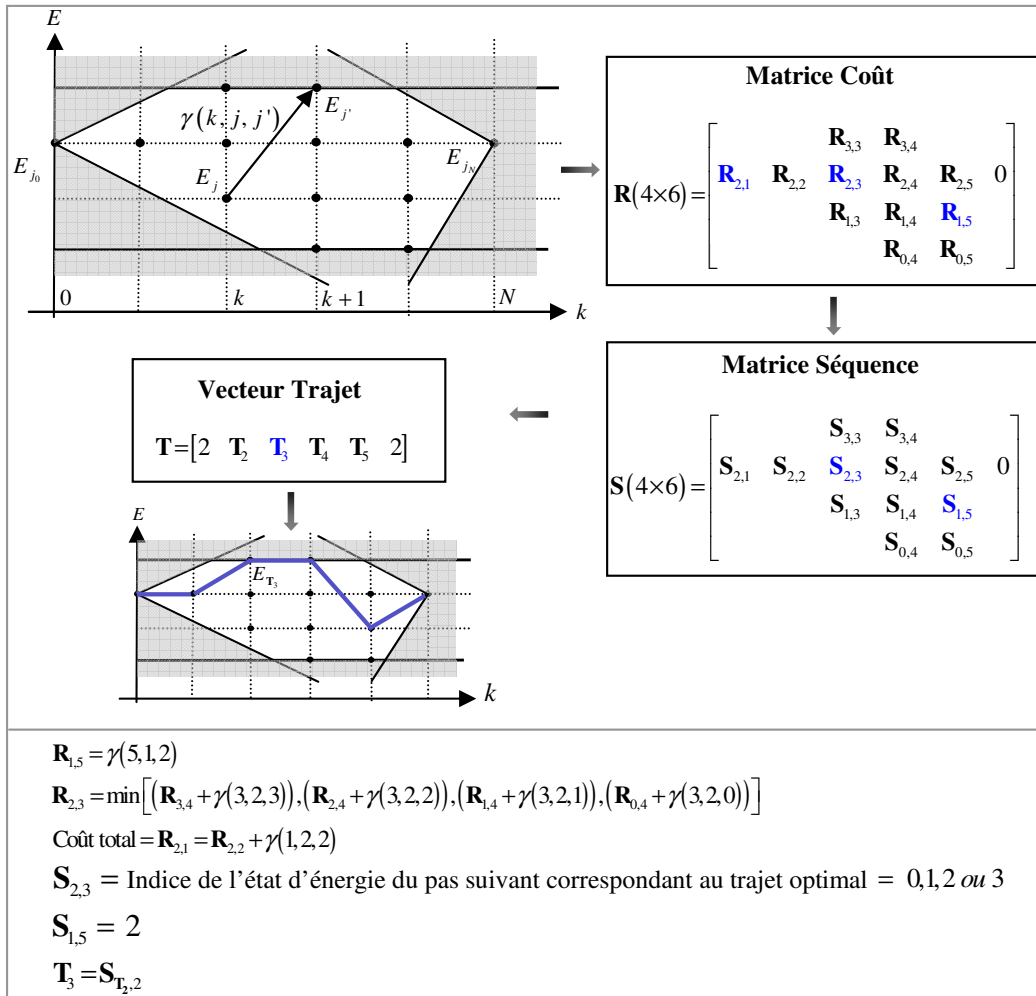


FIG. 3.3 – Schéma illustratif de la démarche de l'algorithme de programmation dynamique

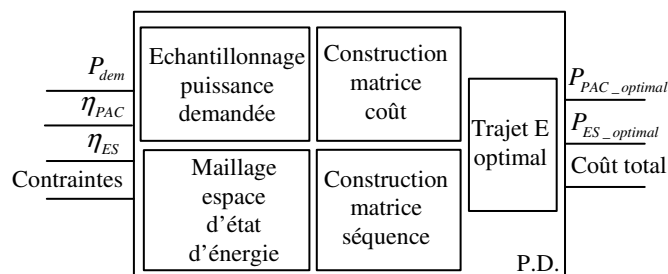


FIG. 3.4 – Schéma bloc de l'algorithme de programmation dynamique

l'ordre de grandeur fixé par le cahier des charges. Les profils de mission INRETS et ESKISEHIR sont respectivement montrés dans les figures 3.5 et 3.6 sachant qu'une étude comparative précise de ces deux profils sera évoquée dans le dernier chapitre. Faut-il enfin préciser que les puissances négatives qui figurent sur ces profils représentent les puissances électriques récupérées lors du freinage régénératif du véhicule dû au fonctionnement en générateur du moteur du groupe motopropulseur.

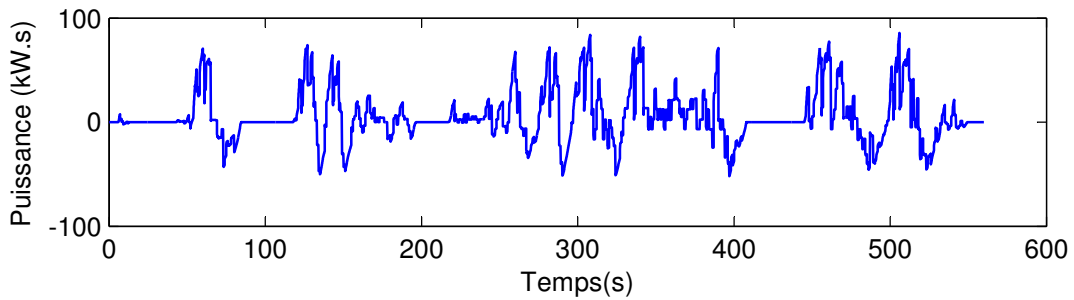


FIG. 3.5 – Profil de mission INRETS

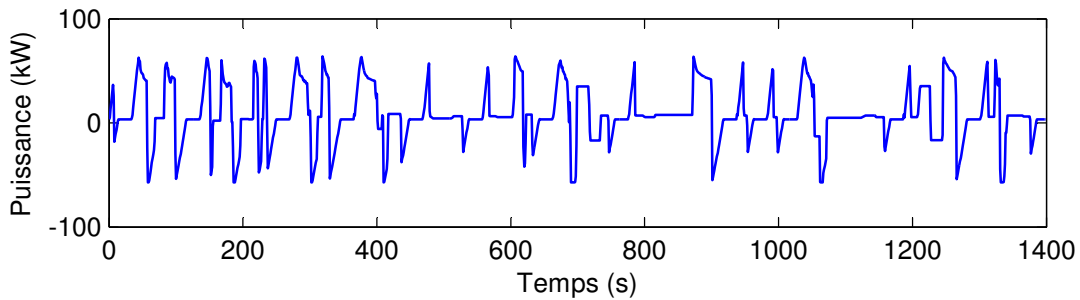


FIG. 3.6 – Profil de mission ESKISEHIR

### 3.3.3.2 Résultats de simulation

L'algorithme de programmation dynamique dans sa version discrétisée présente deux paramètres de réglages, à savoir le pas de discrétisation du temps ( $\Delta t$ ) et le pas de discrétisation de l'état d'énergie de l'élément de stockage  $\Delta E$ . Les profils de puissance demandée sont initialement échantillonnés avec un pas de 0,1 s dans le cas du profil INRETS et 1 s dans le cas du profil ESKISEHIR. Ces deux valeurs correspondent donc au pas  $\Delta t$  minimal, pouvant être choisi par l'algorithme. Ainsi pour  $\Delta t = 0.1s$  et  $\Delta E = 1kW.s$ , la trajectoire optimale de l'état d'énergie de l'élément de stockage depuis sa valeur initiale  $E(j_0) = 900kW.s$  vers sa valeur finale  $E(j_N) = 900kW.s$  dans le cas du profil INRETS est présentée dans la figure 3.7. Cette

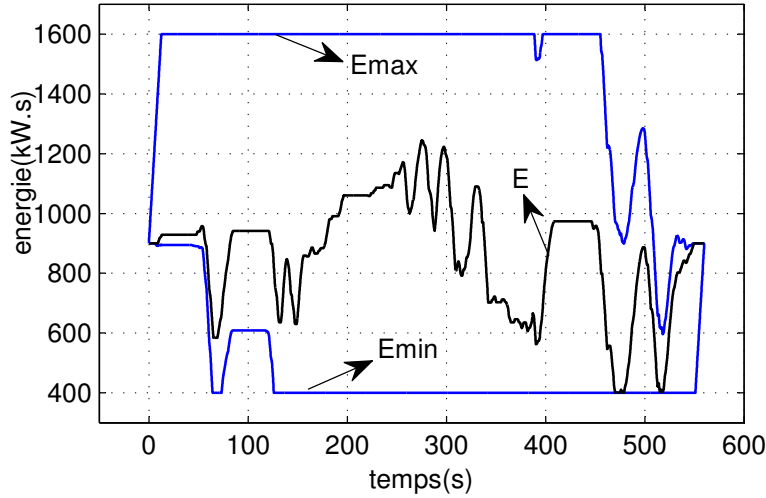


FIG. 3.7 – Trajectoire optimale de l'état d'énergie de l'élément de stockage pour le profil de mission de l'INRETS pour un  $\Delta t = 0,1s$  et  $\Delta E = 1kW.s$

figure montre de même le domaine de validité  $\mathbf{D}$  limité par  $\hat{E}_{\min}$  et  $\hat{E}_{\max}$  comme précisé dans l'équation 3.45.

La distribution optimale de puissances ainsi obtenue dans ce cas est montrée dans la figure 3.8 sur un tronçon de temps  $[0\ 400s]$ . La somme de la puissance optimale fournie par la pile à combustible  $P_{PAC\_opt}(k)$  et la puissance fournie ou absorbée par l'élément de stockage,  $P_{ES\_opt}(k)$ , assure la puissance demandée  $P_{dem}(k)$ , sur la totalité du profil testé tout en respectant les contraintes sur ces puissances.

D'autre part, la trajectoire optimale de l'état d'énergie ainsi que la distribution optimale des puissances dans le cas du profil ESKISEHIR pour  $\Delta t = 1s$  et  $\Delta E = 1kW.s$  sont montrées respectivement dans les figures 3.9 et 3.10. Nous pouvons noter que le profil ESKISEHIR est plus exigeant en énergie que celui de l'INRETS quoique dans les deux cas la contrainte maximale sur l'état d'énergie est largement respectée.

Le coût total quantifié en grandeur énergétique d'après l'équation 3.12 est donné dans le tableau 3.2. Il représente la consommation en hydrogène sur l'horizon de temps étudié pour les deux profils INRETS et ESKISEHIR. Ce tableau évoque la consommation minimale, résultat de l'algorithme de programmation dynamique, tout en comparant ce résultat avec la consommation

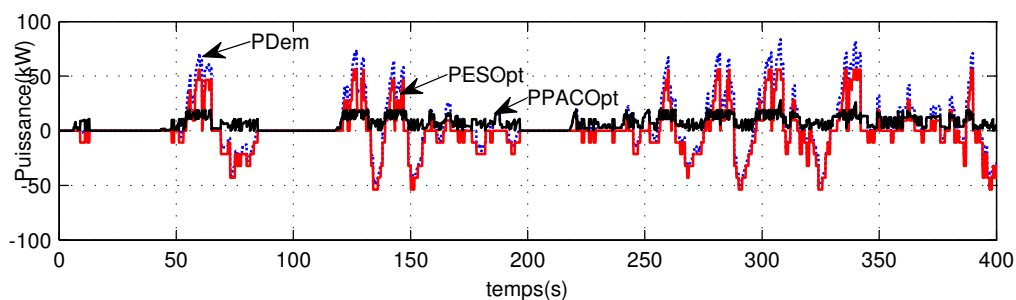


FIG. 3.8 – Distribution de puissance optimale pour le profil de mission de l'INRETS pour un  $\Delta t = 0,1s$  et  $\Delta E = 1kW.s$

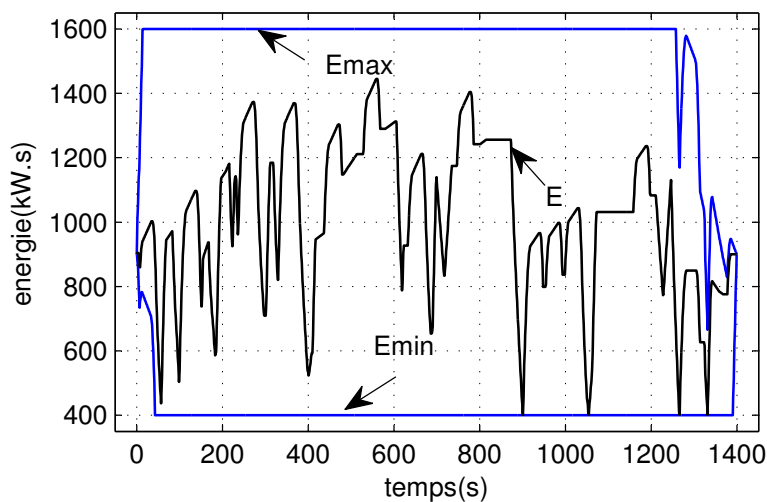


FIG. 3.9 – Trajectoire optimale de l'état d'énergie de l'élément de stockage pour le profil de mission ESKISEHIR pour un  $\Delta t = 1s$  et  $\Delta E = 1kw.s$

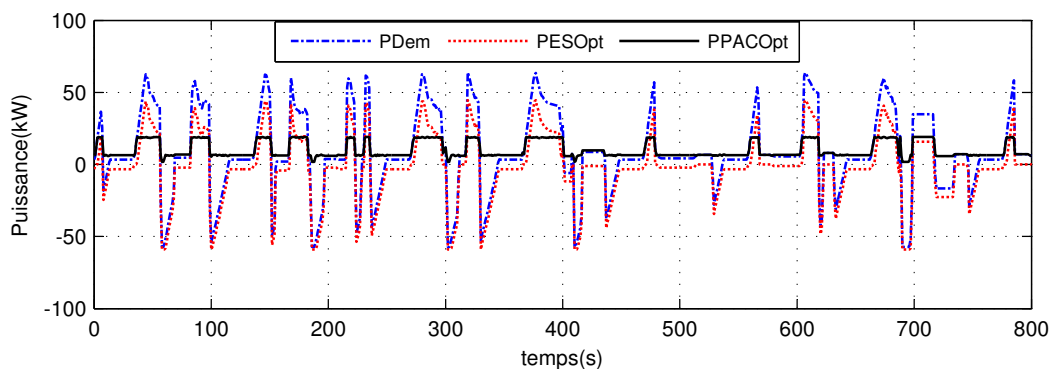


FIG. 3.10 – Distribution de puissance optimale pour le profil de mission d'ESKISEHIR pour un  $\Delta t = 1s$  et  $\Delta E = 1kW.s$ . En noir :  $P_{PAC\_opt}$ , en bleu :  $P_{dem}$  et en rouge :  $P_{ES\_opt}$

d'hydrogène de la pile à combustible si cette dernière devait fournir à elle seule la totalité de la puissance demandée. A partir de cette comparaison, la performance de l'algorithme peut être évaluée. Nous obtenons dans ce cas une diminution de consommation de 38,28 % dans le cas du profil INRETS et de 33,75 % dans le cas d'ESKISEHIR. Cela dit, nous allons par la suite étudier l'effet de variation de  $\Delta t$  et  $\Delta E$  sur la performance de l'algorithme.

TAB. 3.2 – Energie d'hydrogène consommée sur les deux profils de mission étudiés

	Algo P.D.	PAC Seule	Gain
INRETS	9189,7 kW.s	14891 kW.s	38,28 %
ESKISEHIR	31826 kW.s	48043 kW.s	33,75 %

### 3.3.3.3 Variation du pas de discrétisation du temps $\Delta t$

Nous allons étudier dans ce paragraphe l'impact de variation de  $\Delta t$  sur les performances de l'algorithme de programmation dynamique. A ce propos, nous allons comparer les résultats obtenus sur le profil INRETS pour deux valeurs différentes de  $\Delta t$  : 0,1s et 2 s sachant que  $\Delta E = 1kW.s$  dans les deux cas. Dans une première interprétation, il est clair que le pas de discrétisation du temps doit être le plus petit possible, qui est dans notre cas 0,1 s, afin de représenter au mieux le profil de puissance demandée vu qu'en augmentant le pas de discrétisation, plusieurs points ou pics de puissance demandée seront perdus. Cependant, nous pouvons évaluer la puissance optimale  $P_{PAC\_opt}$  à chaque instant  $k$  et maintenir sa valeur constante le long de la période d'échantillonnage. Nous supposons dans ce cas que la puissance de l'élément de stockage  $P_{ES}$  assure la différence entre la puissance réelle demandée et la puissance échantillonnée. Par contre nous ne pouvons plus garantir la tenue des contraintes sur cette puissance.

Les figures 3.11 et 3.12 servent à illustrer la différence entre ces deux pas de calcul en montrant la distribution de puissance optimale sur un tronçon de temps [40s 90s] pour les deux périodes de discrétisation. La différence entre la puissance demandée  $P_{dem}$  et la puissance demandée échantillonnée  $P_{dem\_echant}$  est clairement montrée dans la figure 3.12. Il est cependant intéressant de signaler que le fait d'augmenter la période de discrétisation a permis d'adoucir les fluctuations observées sur la puissance de la pile à combustible. Enfin faut-il préciser que l'augmentation du pas de calcul diminue exponentiellement le temps de simulation de l'algorithme. Le tableau

3.3 montre la consommation et le temps de simulation pour les deux périodes sachant que l'algorithme de programmation dynamique, implanté sous Matlab n'est pas encore optimisé pour consommer le moins de temps possible.

TAB. 3.3 – Résultats de l'algorithme de P.D. pour deux valeurs différentes de  $\Delta t$ , 0,1 et 2 s

Profil	$\Delta t$ (s)	$\Delta E$ (kW.s)	Consom.	Temps simul.
INRETS	0,1	1	9189,7 kW.s	48 h
INRETS	2	1	10362 kW.s	6 h

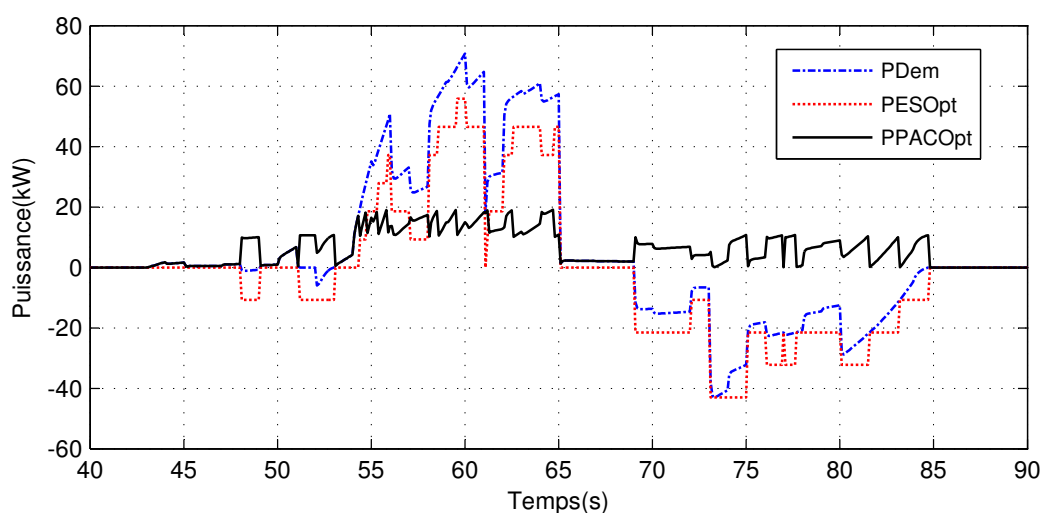


FIG. 3.11 – Distribution de puissance optimale pour le profil de mission de l'INRETS pour un  $\Delta t = 0,1$ s et  $\Delta E = 1$ kW.s. En noir :  $P_{PAC\_opt}$ , en bleu :  $P_{dem}$  et en rouge :  $P_{ES\_opt}$

### 3.3.3.4 Variation du pas de discrétisation de l'état d'énergie $\Delta E$

Dans ce paragraphe nous allons étudier l'effet de variation du pas de discrétisation de l'état d'énergie de l'élément de stockage,  $\Delta E$ . A ce propos nous allons comparer le résultat de simulation sur le profil ESKISEHIR pour deux valeurs différentes de  $\Delta E$ , 1 kW.s et 5 kW.s pour un  $\Delta t$  de 1 s. La figure 3.13 représente la trajectoire optimale de l'état d'énergie le long du profil pour chacune de ces deux valeurs. Les puissances optimales de la pile à combustible,  $P_{PAC\_opt}$ , et de l'élément de stockage,  $P_{ES\_opt}$ , pour chacun de ces deux pas de discrétisation sont montrées dans la figure 3.14. Enfin, le tableau 3.4 compare la consommation et le temps de simulation

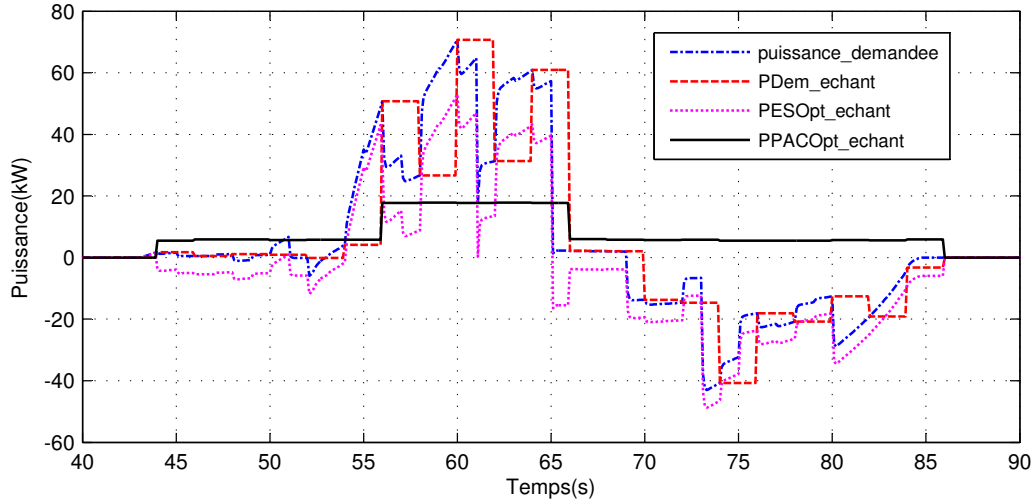


FIG. 3.12 – Distribution de puissance optimale pour le profil de mission de l'INRETS pour un  $\Delta t = 2s$  et  $\Delta E = 1kW.s$ . En bleu :  $P_{dem}$ , en rouge :  $P_{dem\_echant}$ , en magenta :  $P_{ES\_opt}$  et en noir :  $P_{PAC\_opt}$

obtenus pour chaque cas.

Il est évident qu'augmenter le pas de discrétisation de l'état d'énergie diminue considérablement le temps de simulation de l'algorithme mais cela au détriment de la consommation d'hydrogène comme montré dans le tableau 3.4. Or dans ce cas, pour une diminution considérable du temps de simulation, l'augmentation de consommation n'excède pas 0,12 %. Dans tous les cas, un compromis entre temps de simulation et précision de l'algorithme doit être pris en compte. D'autre part, nous pouvons observer sur la figure 3.14 que le fait d'augmenter la valeur de  $\Delta E$ , augmente la variation de la puissance de la pile à combustible en diminuant celle de la puissance de l'élément de stockage ce qui n'est pas appréciable puisque l'élément de stockage qui est dans notre cas le pack de supercondensateurs est conçu pour satisfaire les variations rapides de puissances alors que la pile à combustible présente des limites à ce sujet (débit d'air et d'hydrogène limité).

Il faut noter enfin que l'augmentation de  $\Delta E$  ne peut se faire au delà d'une limite précise qui est dans notre cas 7 kW.s. Cela est dû au fait que l'algorithme de programmation dynamique tel qu'il est implanté, fournit la trajectoire optimale si elle existe en respectant les contraintes



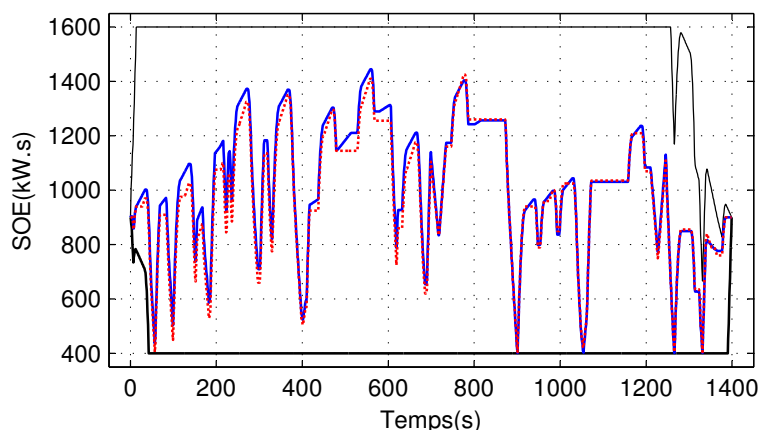


FIG. 3.13 – Trajectoire optimale de l'état d'énergie de l'élément de stockage pour le profil de mission ESKISEHIR pour  $\Delta E = 1kW.s$  et  $\Delta E = 5kW.s$  ( $\Delta t = 1s$ ). En bleu :  $\Delta E = 1kW.s$ , en rouge pointillé :  $\Delta E = 5kW.s$

sur les puissances et l'état d'énergie et en assurant la demande en puissance positive soit elle ou négative. Cela se traduit par les valeurs limites de la puissance de l'élément de stockage calculées dans les équations 3.39 à 3.44. Les limites inférieure et supérieure de  $P_S(k)$  comme montrées dans la figure 3.15 sur un tronçon de temps présentent des zones assez contraignantes, marquées sur la figure par les ellipses. Ceci dit,  $\Delta E$  doit être assez faible pour permettre des petits pas de variation de la puissance.

TAB. 3.4 – Résultats de l'algorithme de P.D. pour deux valeurs différentes de  $\Delta E$ , 1 et 5 kW.s

Profil	$\Delta t$ (s)	$\Delta E$ (kW.s)	Consom.	Temps simul.
ESKISEHIR	1	1	31826 kW.s	52 h
ESKISEHIR	1	5	31863 kW.s	3 h

## 3.4 Commande optimale

### 3.4.1 Principe de la méthode

Nous allons commencer par énoncer la formulation hamiltonienne du principe du minimum de Pontriaguine d'une manière simplifiée sachant que pour plus de détails, de rigueur mathématique ou éventuellement de démonstration on peut se référer à des ouvrages dédiés [Ber00],

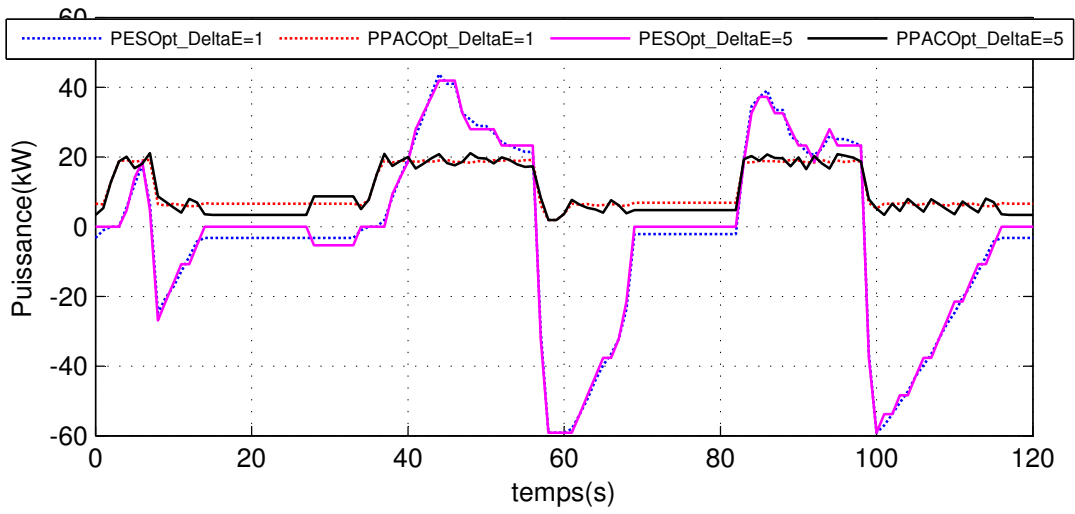


FIG. 3.14 – Distribution de puissance optimale pour le profil de mission ESKISEHIR pour  $\Delta E = 1kW.s$  et  $\Delta E = 5kW.s$  ( $\Delta t = 1s$ ). En bleu (pointillé) :  $P_{ES\_opt}$  pour  $\Delta E = 1kW.s$ , en magenta :  $P_{ES\_opt}$  pour  $\Delta E = 5kW.s$ , en rouge (pointillé) :  $P_{PAC\_opt}$  pour  $\Delta E = 1kW.s$ , et en noir :  $P_{PAC\_opt}$  pour  $\Delta E = 5kW.s$

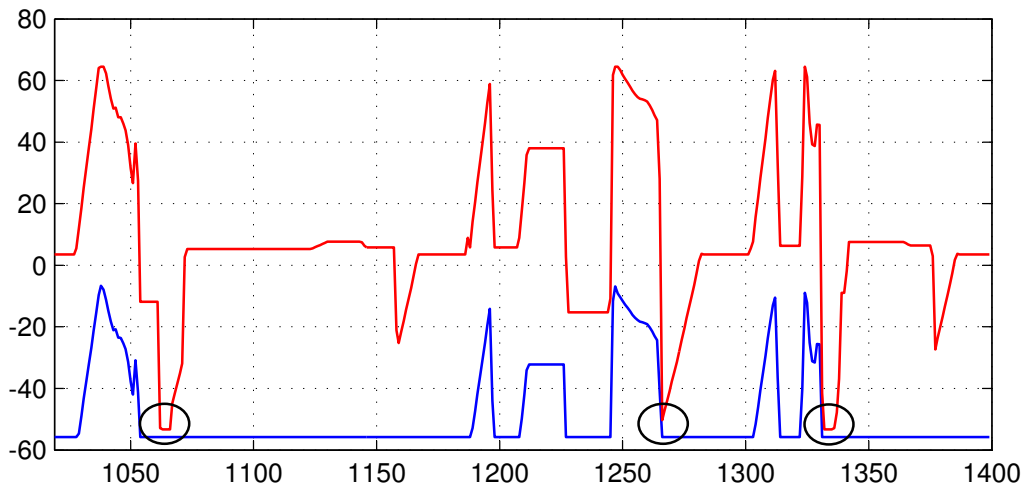


FIG. 3.15 – Bornes inférieure et supérieure de la puissance absorbée  $P_S(t)$  pour le profil de mission ESKISEHIR pour  $\Delta t = 1s$ . En bleu :  $P_{S\_min}(t)$  et en rouge :  $P_{S\_max}(t)$

[SW77].

Soit la fonction  $H(x, u, p)$  appelée fonction hamiltonienne (ou simplement le hamiltonien) appliquée sur le système défini à travers les équations 3.1 à 3.4 tel que :

$$H(x(t), u(t), \lambda(t)) = \gamma(x(t), u(t)) + \lambda^T(t) f(x(t), u(t)) \quad (3.54)$$

Où  $\lambda(t)$ , appelé état adjoint du système, est la solution de l'équation adjointe suivante :

$$\dot{\lambda}(t) = -\frac{\partial H(x^*(t), u^*(t), \lambda(t))}{\partial x} \quad (3.55)$$

Soit  $\{u^*(t) | t \in [t_i, t_f]\}$  une trajectoire de commande optimale et soit  $\{x^*(t) | t \in [t_i, t_f]\}$  la trajectoire d'état optimale correspondante tel que :

$$\dot{x}^*(t) = f(x^*(t), u^*(t))$$

avec :

$$x^*(t_i) = x(t_i) \quad \text{donné.}$$

Pour chaque  $t \in [t_i, t_f]$ , la solution optimale du problème vérifie le principe du minimum :

$$H(x^*(t), u^*(t), \lambda^*(t)) \leq H(x^*(t), u(t), \lambda^*(t)) \quad \forall u \in \mathbf{D} \quad (3.56)$$

$\mathbf{D}$  étant l'ensemble des valeurs admissibles de la commande  $u$ .

Il est nécessaire de noter que le Principe du Minimum présente des conditions d'optimalité nécessaires mais pas suffisantes. Les trajectoires de commande optimales vérifient ces conditions par contre si une trajectoire de commande vérifie ces conditions, elle n'est pas nécessairement optimale. Une étude supplémentaire doit être faite pour prouver que la solution obtenue est l'optimale. Une méthode pour démontrer que la solution obtenue est optimale consiste ainsi à démontrer que l'ensemble  $\mathbf{D}$  ainsi que la fonction coût,  $\gamma$  sont convexes [Ber00].

### 3.4.2 Implantation de l'algorithme

La solution du problème d'optimisation formulé dans la section 3.2 se réduit alors à trouver la commande  $u(t)$  qui minimise le hamiltonien  $H$  du système. La gestion des contraintes dans

la méthode de commande optimale reste une affaire délicate et nécessite une attention particulière. Nous allons donc commencer par aborder la solution du problème sans contraintes avant d'intégrer au fur et à mesure les contraintes sur la commande et l'état du système. Nous allons cependant considérer la puissance fournie par la pile à combustible,  $P_{PAC}$ , comme variable de commande au lieu de  $P_{ES}$  vu que la formulation du problème reste la même puisque  $P_{PAC}$  et  $P_{ES}$  sont reliés par la relation :  $P_{PAC} + P_{ES} = P_{dem}$ .

### 3.4.2.1 Cas sans contraintes

D'après les équations 3.5 et 3.12, le Hamiltonien est donné par la relation suivante :

$$H = \gamma(P_{PAC}(t)) + \lambda(t) f(P_{ES}(t)) = \frac{P_{PAC}(t)}{\eta_{PAC}(P_{PAC}(t))} - \lambda(t) P_S(P_{ES}(t)) \quad (3.57)$$

L'équation canonique 3.55 donne :

$$\dot{\lambda}(t) = \frac{\partial H}{\partial E} = 0 \Rightarrow \lambda(t) = \lambda(0) = cte \quad (3.58)$$

Si aucune contrainte n'est imposée sur la variable de commande  $u$ , l'équation 3.56 est vérifiée si la dérivée partielle de  $H$  suivant  $u$  est nulle :

$$\frac{\partial H}{\partial u} = \frac{\partial H}{\partial P_{PAC}} = 0 \quad (3.59)$$

Ce qui implique :

$$\frac{\partial \gamma(P_{PAC})}{\partial P_{PAC}} - \lambda \frac{\partial P_S(P_{ES})}{\partial P_{PAC}} = 0 \quad (3.60)$$

Vu que  $P_{ES} = P_{dem} - P_{PAC}$ , nous avons :

$$\frac{\partial P_S}{\partial P_{PAC}} = \frac{\partial P_S}{\partial P_{ES}} \cdot \frac{\partial P_{ES}}{\partial P_{PAC}} = -\frac{\partial P_S}{\partial P_{ES}} \quad (3.61)$$

L'équation 3.60 s'écrit alors :

$$\frac{\partial \gamma(P_{PAC})}{\partial P_{PAC}} + \lambda \frac{\partial P_S(P_{ES})}{\partial P_{ES}} = 0 \quad (3.62)$$

Nous allons procéder par une approximation polynomiale des fonctions  $\gamma(P_{PAC})$  et  $P_S(P_{ES})$  afin de pouvoir les dériver analytiquement. Les expressions de  $\gamma(P_{PAC})$  et  $P_S(P_{ES})$  sont ainsi

données à travers les équations 3.63 et 3.64. Le tableau 3.5 regroupe les coefficients des polynômes estimés alors que la figure 3.16 montre les courbes résultant de l'estimation en comparaison avec celles issues des simulations comme évoqué dans le chapitre 2.

$$\gamma(P_{PAC}) = a_2 P_{PAC}^2 + a_1 P_{PAC} + a_0 \quad (3.63)$$

$$P_S(P_{ES}) = b_2 P_{ES}^2 + b_1 P_{ES} + b_0 \quad (3.64)$$

En remplaçant  $\gamma(P_{PAC})$  et  $P_S(P_{ES})$  par leurs valeurs dans l'équation 3.62,  $P_{PAC}$  est alors donnée par l'équation suivante :

$$P_{PAC}(t) = \frac{a_1 + \lambda b_1 + 2\lambda b_2 P_{dem}(t)}{2(a_2 - \lambda b_2)} \quad (3.65)$$

Avec  $(a_2 - \lambda b_2) > 0$  afin de vérifier la condition du minimum :

$$\frac{\partial^2 H}{\partial P_{PAC}^2} \geq 0$$

TAB. 3.5 – Coefficients des polynômes résultats de l'estimation de  $\gamma(P_{PAC})$  et  $P_S(P_{ES})$

$a_2$	$a_1$	$a_0$	$b_2$	$b_1$	$b_0$
0,0205	1,2344	9,032	0,0011	1,0026	0,8236

Cela dit, le problème d'optimisation se réduit à trouver la valeur de la constante  $\lambda$  qui minimise le critère. La condition de maintien de l'état de charge ou d'énergie de l'élément de stockage traduite par l'équation 3.66 impose une condition supplémentaire permettant de fixer la valeur de  $\lambda$ . Ainsi pour  $E(t_N) = E(t_0) = 900kW.s$ , la valeur de  $\lambda$  est dans ce cas égale à  $-1.51$  dans le cas du profil INRETS et  $-1.62$  pour le profil ESKISEHIR. La distribution optimale des puissances,  $P_{PAC\_opt}$  et  $P_{ES\_opt}$ , obtenue avec les valeurs données de  $\lambda$  pour les deux profils de mission est montrée dans la figure 3.17 alors que l'évolution de l'état d'énergie de l'élément de stockage le long du profil est représentée dans la figure 3.18. La consommation d'hydrogène notée sur les deux profils est donnée dans le tableau 3.6. Cette consommation est évaluée moyennant les tables de rendement obtenues en simulation afin d'être comparée à la

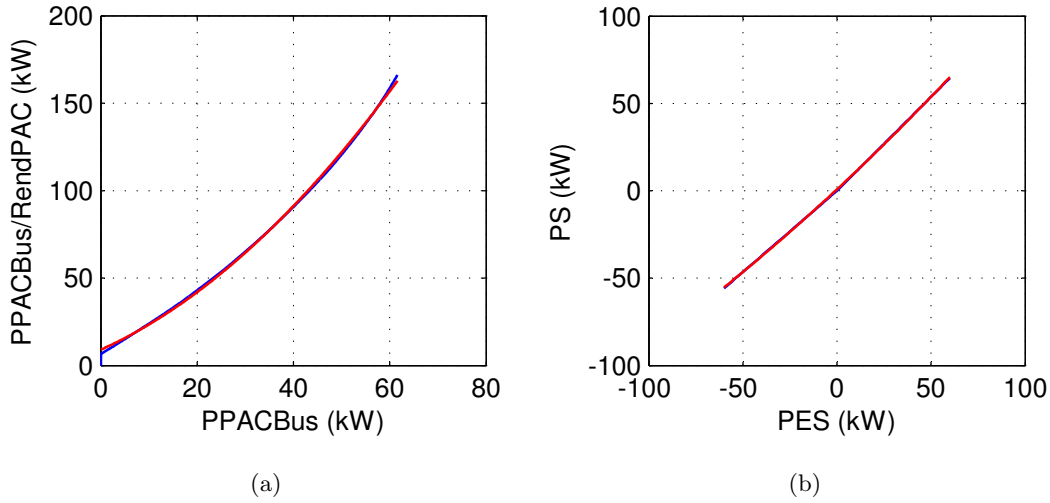


FIG. 3.16 – (a) Courbes de  $\gamma(P_{PAC})$ ; (b) Courbes de  $P_S(P_{ES})$ .

consommation engendrée par l'algorithme de programmation dynamique.

$$E(t_N) = E(t_0) \quad (3.66)$$

TAB. 3.6 – Energie d'hydrogène consommée sur les deux profils de mission étudiés

	C.O.	Algo P.D.	PAC Seule
INRETS	10165 kW.s	9189,7 kW.s	14891 kW.s
ESKISEHIR	32137 kW.s	31826 kW.s	48043 kW.s

Il est clair que les contraintes imposées par le cahier des charges ne sont pas satisfaites dans cette version de la commande optimale. Si la puissance optimale de la pile à combustible  $P_{PAC\_opt}$  reste dans les limites imposées puisqu'elle doit être la plus faible possible, la puissance de l'élément de stockage dépasse de peu les limites maximales et minimales. Par contre, l'état de charge de l'élément de stockage atteint des limites inférieures inacceptables comme montré dans la figure 3.18(b). Dans tous les cas, la gestion des contraintes doit être prise en compte vu que la méthode appliquée doit être généralisée à tout exemple de dimensionnement.

### 3.4.2.2 Introduction des contraintes sur l'état

Nous allons évoquer au cours de ce paragraphe la possibilité de prendre en considération la contrainte sur l'état de charge donnée par l'équation 3.9. Une solution acceptable consiste à

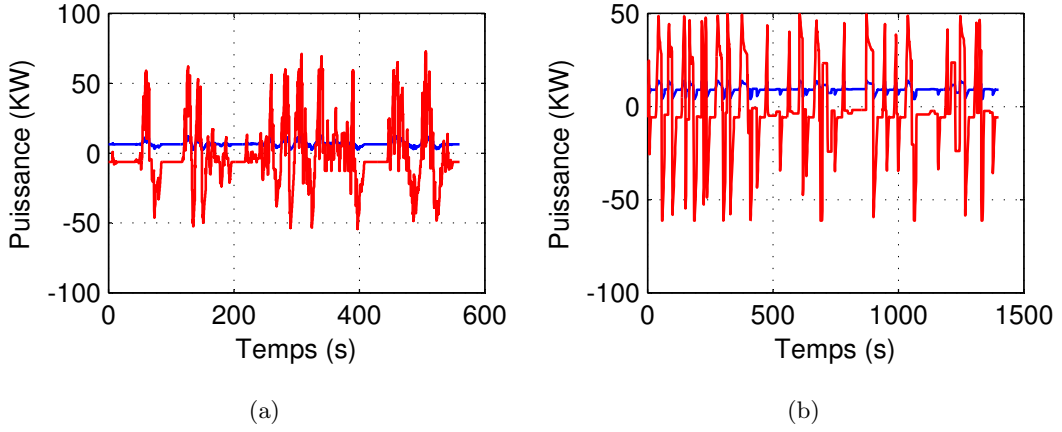


FIG. 3.17 – Distribution optimale de puissances dans le cas de la commande optimale sans contraintes le long des profils (a) INRETS; (b) ESKISEHIR. En bleu :  $P_{PAC\_opt}$ , en rouge :  $P_{ES\_opt}$

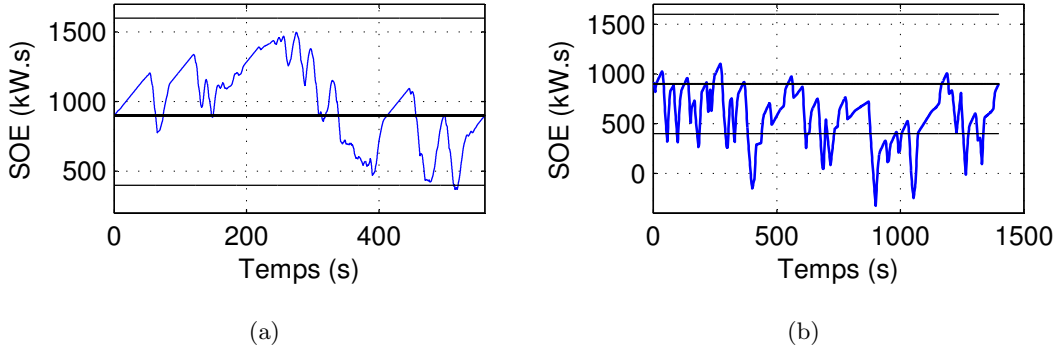


FIG. 3.18 – Évolution de l'état d'énergie de l'élément de stockage le long du profil de mission : (a) INRETS; (b) ESKISEHIR.

rapprocher l'état de charge  $E(t)$  de sa valeur moyenne  $E(t_0) (= E(t_N))$  en minimisant la surface donnée par  $|E(t) - E(t_0)|$  le long du profil. En d'autres termes, le critère d'optimisation initial est ainsi modifié afin de tenir compte de cette contrainte supplémentaire. Le nouveau critère  $\gamma'$  est ainsi donné par l'équation suivante :

$$\gamma' = \frac{P_{PAC}}{\eta_{PAC} (P_{PAC})} + \tau (E(t) - E(t_0))^2 \quad (3.67)$$

où  $\tau$  est un paramètre de réglage à estimer.

L'hamiltonien est dans ce cas donné par l'équation :

$$H = \gamma (P_{PAC}(t)) - \lambda P_S(P_{ES}(t)) + \tau \left( (E(t) - E(t_0))^2 \right) \quad (3.68)$$

L'expression de la commande optimale  $P_{PAC\_opt}$  est alors :

$$P_{PAC}(t) = -\frac{a_1 + b_1 \cdot \lambda(t) + 2b_2 \cdot \lambda(t) \cdot P_{dem}(t)}{2(a_2 - b_2 \cdot \lambda(t))} \quad (3.69)$$

Avec :

$$\frac{\partial H}{\partial E} = -\dot{\lambda} \Rightarrow \dot{\lambda} = -2\tau (E(t) - E(t_0))$$

En régime discret :

$$\lambda(k+1) = \lambda(k) - 2T_e \cdot \tau \cdot (E(k) - E(t_0)) \quad (3.70)$$

Cela dit, le problème d'optimisation consiste à trouver les valeurs de  $\tau$  et de  $\lambda(0)$  qui permettent de respecter la condition de maintien de l'état de charge ( $E(t_0) = E(t_f)$ ) et les limites maximales et minimales de l'état de charge,  $E_{min}$  et  $E_{max}$ . Nous avons ainsi appliqué un algorithme qui effectue la recherche de ces valeurs par dichotomie moyennant une approche graphique. Nous fixons tout d'abord des marges autour des valeurs demandées des contraintes  $E_{min}$ ,  $E_{max}$  et  $E(t_f)$ . Nous déterminons l'ensemble des valeurs de  $\tau$  et de  $\lambda(0)$  qui permettent de satisfaire ces marges. Nous resserrons au fur et à mesure les marges autour des contraintes désirées tout en augmentant la précision de la recherche jusqu'à identifier le couple ( $\tau$ ,  $\lambda(0)$ ) le plus convenable possible.

L'application de cet algorithme sur les deux profils de mission étudiés nous a permis d'approcher les valeurs des limites imposées sans pour autant arriver à totalement satisfaire ces valeurs. Le tableau 3.7 regroupe les valeurs de  $\tau$  et de  $\lambda(0)$  identifiées sur chacun des deux profils. Le tableau 3.8 montre l'amélioration en consommation apportée par l'algorithme de commande optimale avec et sans contraintes comparée à celle issue de l'algorithme de programmation dynamique, toujours exprimée en pourcentage par rapport au cas sans hybridation.

La figure 3.19 montre les profils de puissance de la pile à combustible  $P_{PAC\_opt}$  et l'élément de stockage  $P_{ES\_opt}$  donnés par l'algorithme de commande optimale après avoir remplacé  $\lambda(t)$



TAB. 3.7 – Les valeurs de  $\tau$  et  $\lambda(0)$  identifiées sur les profils INRETS et ESKISEHIR

Profil	$\tau$	$\lambda(0)$
INRETS	$-2,4 \cdot 10^{-7}$	-1.546
ESKISEHIR	$-2.081 \cdot 10^{-7}$	-1.6831

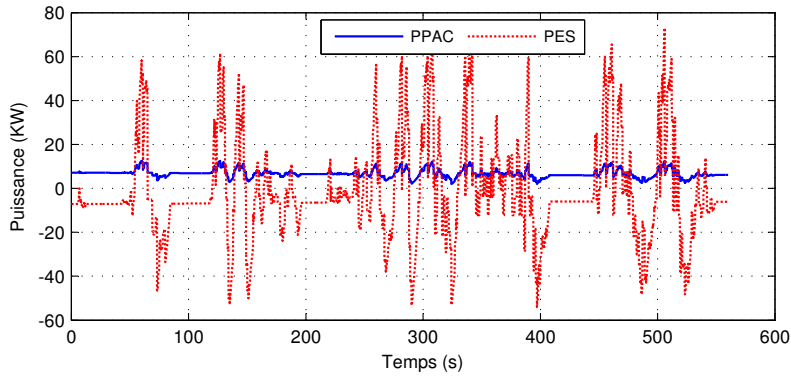
TAB. 3.8 – Amélioration en consommation apportée par l’algorithme de commande optimale avec (C.O.A.C.) et sans (C.O.S.C.) contraintes

Profil	C.O.S.C.	C.O.A.C.	Algo P.D.
INRETS	31,75 %	31,6 %	38,28
ESKISEHIR	33,1 %	31,75 %	33,75

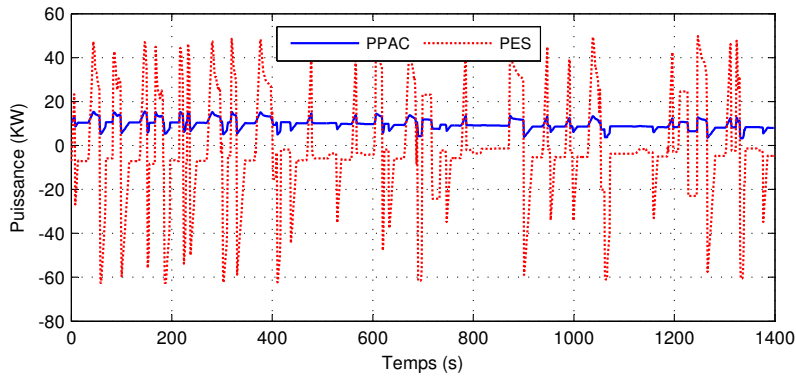
par sa valeur dans l’équation 3.69. La variation de  $\lambda(t)$  étant assez faible le long des deux profils, le profil de puissance PAC engendré par cet algorithme suit le profil de puissance demandée à une constante près d’après l’équation 3.69. De ce fait, l’algorithme présente une marge de manoeuvre assez limitée en liant le profil de puissance de la pile à celle de la puissance demandée. L’évolution de l’état de charge le long des deux profils est montrée dans la figure 3.20. Bien que nous ayons pu faire varier cet état en respectant les limites maximales et minimales de l’état de charge, nous avons dû en revanche relâcher la contrainte supplémentaire sur l’état de charge final dans le cas du profil ESKISEHIR. Il est nécessaire de préciser que la gestion des contraintes dans cette approche hamiltonienne de la commande optimale s’est avérée une tâche délicate dans notre type d’application. La condition ajoutée au critère initial afin de respecter les contraintes sur l’état de charge d’après l’équation 3.67 reste une condition basique et doit être nécessairement améliorée dans les travaux ultérieurs que nous plaçons en perspectives pour aborder plutôt en priorité, une approche en ligne.

### 3.5 Conclusion

Comme précisé dans l’introduction de ce chapitre, l’idée principale derrière l’utilisation de méthodes d’optimisation globale est d’acquérir une expertise nécessaire vis à vis de la distribution des puissances dans le groupe électrogène et d’obtenir, de plus, un ordre de grandeur

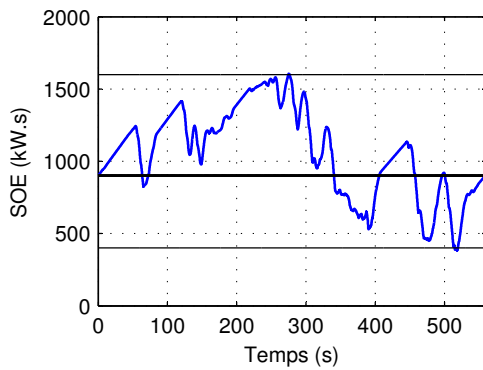


(a)

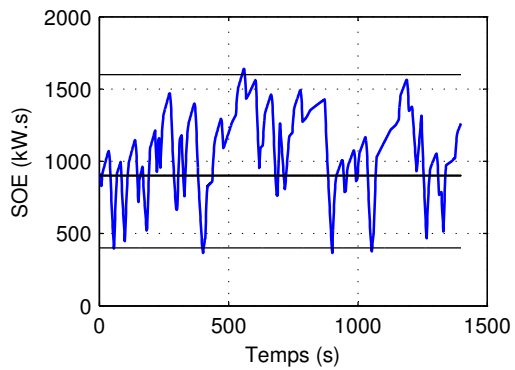


(b)

FIG. 3.19 – Distribution optimale de puissances dans le cas de la commande optimale avec contraintes le long des profils (a) INRETS ; (b) ESKISEHIR



(a)



(b)

FIG. 3.20 – Évolution de l'état d'énergie de l'élément de stockage le long du profil de mission : (a) INRETS ; (b) ESKISEHIR.

servant de référence de comparaison dans l'évaluation des stratégies de gestion en temps réel de ce groupe. Dans cette perspective, l'utilisation de deux méthodes ou approches différentes d'optimisation dynamique est primordial du fait que ces deux méthodes vont servir de moyen de validation mutuelle des résultats obtenus.

Théoriquement, le principe du maximum est, par nature, une condition nécessaire d'optimalité tandis que la programmation dynamique fournit une condition suffisante [Kan04]. De ce fait, et toujours en théorie, la condition de l'optimal global est notamment plus garantie avec l'application de la programmation dynamique qu'avec le principe du maximum. Les résultats de ces deux méthodes montrés dans le tableau 3.8 viennent consolider cette théorie. De plus, la gestion des contraintes parfaitement assurée par l'algorithme de programmation dynamique n'offre pas la même aisance dans l'autre cas. Cependant, en pratique, l'implantation numérique des deux méthodes présente des limitations qui font en sorte que dans les deux cas, un optimal global n'est pas tout à fait garanti. Si l'approximation polynomiale des rendements ainsi que la gestion des contraintes sont les principales limitations de l'algorithme de commande optimale, la discrétisation de l'espace continu, d'autre part, réduit plus ou moins la performance de l'algorithme de programmation dynamique.

En résumé, les résultats obtenus dans ce chapitre montrent que l'on peut radicalement améliorer la consommation en hydrogène du véhicule hybride à pile à combustible en adoptant une bonne stratégie de gestion de l'énergie électrique dans le groupe électrogène. D'autre part, le choix d'une approche d'optimisation idéale n'est pas possible. L'algorithme de programmation dynamique offre une meilleure référence mais au détriment d'un temps de calcul pouvant être exorbitant, un temps de calcul qui est nettement réduit avec l'approche de commande optimale. Dès lors, l'application en temps réel de l'algorithme de programmation dynamique n'est pas envisageable par contre l'approche de commande optimale peut être adaptée à une application en ligne, cette dernière possibilité étant exploitée dans des travaux récents [Ber07].

Cela dit, nous allons, dans le chapitre suivant, appliquer des stratégies de gestion en ligne (sans connaissance préalable du futur du parcours suivi) basées sur la logique floue.



# Gestion en Ligne de la Distribution de Puissance du Groupe Électrogène Hybride

## 4.1 Introduction

Au cours du chapitre précédent nous avons traité la gestion de l'énergie électrique en tant que problème d'optimisation globale. La solution optimale obtenue exige une connaissance préalable du profil de mission qui se traduit par une puissance demandée connue sur un intervalle de temps donné. Nous allons, au cours de ce chapitre, traiter le problème de gestion en ligne de l'énergie électrique. L'objectif principal est toujours d'assurer la demande en puissance du groupe motopropulseur en minimisant autant que possible la consommation d'hydrogène. Les contraintes imposées par le dimensionnement des éléments du système doivent être respectées et une attention supplémentaire doit être portée sur le maintien de l'état de charge de l'élément de stockage. Le défi majeur dans cet objectif est notamment le fait que le trajet parcouru par le véhicule hybride est inconnu a priori. Le bloc de gestion d'énergie doit ainsi répondre à une sollicitation instantanée de puissance sans connaissance préalable du futur du profil de puissance demandée. Une solution optimale étant impossible dans ce cas, l'enjeu est de trouver la solution qui s'approche le plus possible de cet optimum.

Les stratégies de commande pour les véhicules hybrides sont des sujets d'actualité où de

nombreux industriels et chercheurs sont activement impliqués. A ce jour, aucune approche ou stratégie n'a pu s'imposer ou exclure les autres et un important travail doit être fait afin de grouper et comparer les différentes stratégies. Néanmoins, les différentes approches utilisées à ce propos peuvent être classées en deux catégories distinctes à savoir les stratégies à base de règles et les stratégies basées sur l'optimisation [Sal07] comme montré dans la figure 4.1. La mise en oeuvre ainsi que la complexité de ces stratégies dépendent d'une architecture de véhicule hybride à l'autre : série, parallèle ou complexe.

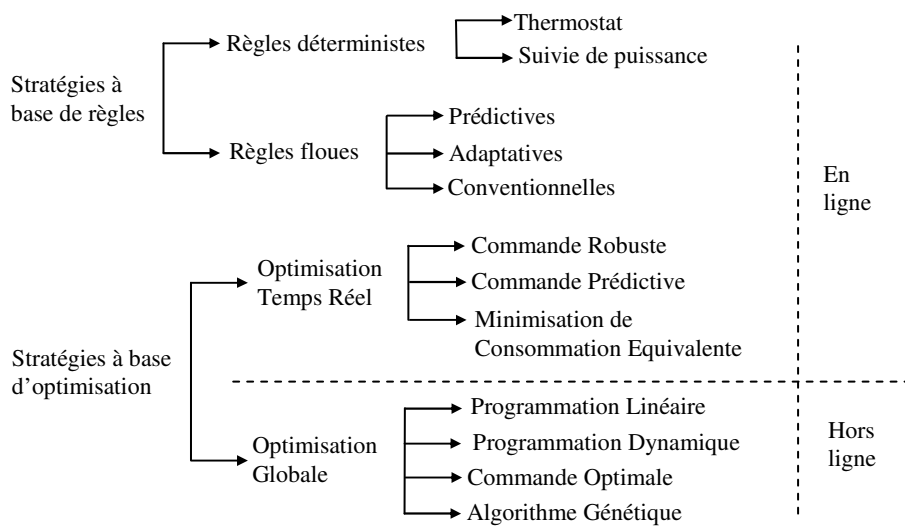


FIG. 4.1 – Classification des différentes stratégies de gestion d'énergie dans un véhicule hybride

Les stratégies de commande pour des véhicules hybrides à pile à combustible et précisément le contrôle de la distribution de puissance entre la pile et l'élément de stockage restent peu exploitées en littérature. Cependant les différentes stratégies appliquées dans le cas des véhicules hybrides conventionnels peuvent être aisément adaptées au cas d'un véhicule hybride à pile à combustible [RGG<sup>+</sup>03]. Dans cette perspective, nous citons, entre autres, l'application d'une stratégie de commande temps réel basée sur la commande optimale [BDBG07] et d'une stratégie de commande basée sur la minimisation de la consommation équivalente ou ECMS pour Equivalent Consumption Minimization Strategy [RPS05]. La consommation équivalente tient compte de la consommation réelle d'hydrogène et d'une consommation fictive représentant l'énergie électrique nécessaire pour recharger l'élément de stockage tout en ramenant cette énergie au réservoir d'hydrogène moyennant les expressions des rendements moyens de la pile et de l'élément de stockage. Il faut par là préciser que l'objectif visé peut différer d'une stratégie à

l'autre. Alors que nous ciblons la minimisation de la consommation d'hydrogène en supposant les différents éléments de la chaîne de traction adéquatement contrôlés afin de suivre les consignes de puissances, d'autres stratégies de gestion d'énergie traitent d'autres aspects relatifs à la commande de ces éléments. A titre d'exemple, une approche basée sur la commande prédictive est utilisée dans [VSP06] pour empêcher le déficit en oxygène et la saturation du compresseur tout en assurant la demande de puissance.

La stratégie de gestion en ligne adoptée dans le cadre de notre étude est basée sur un système de règles d'inférence floues optimisé moyennant un algorithme génétique. Dans une première approche, un algorithme simple à base de règles (déterministes) est exposé. Nous allons ensuite évoquer les limitations de cet algorithme et les améliorations apportées par l'utilisation d'un système d'inférence flou. Le système d'inférence flou nécessite une phase de réglage de ses paramètres basée sur l'expertise d'une part mais aussi sur des essais-erreurs d'autre part. A ce propos, un algorithme génétique est utilisé afin d'optimiser le choix des paramètres du contrôleur flou.

## 4.2 Stratégie de gestion en ligne à base de règles

### 4.2.1 Principe de la méthode

A un niveau primitif, des algorithmes à base de règles sont généralement utilisés en vue de leur simplicité. Dans cette catégorie, nous pouvons mentionner la méthode appelée « thermostat » (on/off) dans laquelle l'état de charge de l'élément de stockage est maintenu entre deux bornes inférieure et supérieure prédéfinies. Or cette stratégie ne peut pas satisfaire la demande de puissance du véhicule pour toute condition de fonctionnement ; de même aucune notion de minimisation de combustible n'est prise en compte par cette stratégie. Une seconde approche consiste à faire fonctionner la pile à combustible au voisinage de son point de rendement maximal, une approche que nous avons appelé MEPT ou Maximum Efficiency Point Tracking par référence au MPPT utilisé dans le cas des panneaux photovoltaïques ou des éoliennes. De même, cette méthode présente des limitations au niveau de la gestion des contraintes et surtout du maintien de l'état de charge de l'élément de stockage. Partant de ces observations, nous avons adopté un algorithme basé sur des règles en imposant une limite supérieure et inférieure à l'état de charge ou d'énergie de l'élément de stockage,  $E_{sup}$  et  $E_{inf}$  ainsi qu'une limite inférieure et supérieure à

la puissance fournie par la pile à combustible,  $P_{PAC\_inf}$  et  $P_{PAC\_sup}$  (figure 4.2).

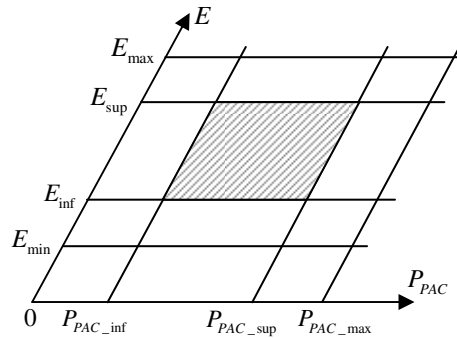


FIG. 4.2 – Limites supérieures et inférieures imposées sur l'état de charge et la puissance de la pile à combustible

#### 4.2.2 Algorithme de commande

L'idée générale derrière le choix des limites sur l'élément de stockage est de maintenir son état de charge dans une fourchette acceptable. D'autre part, les limites sur  $P_{PAC}$  offrent un degré de liberté supplémentaire aidant à optimiser le fonctionnement de la pile. Dans cette stratégie, nous distinguons les trois modes de fonctionnement possibles du véhicule, à savoir le mode « arrêt », le mode « traction » et le mode « freinage » (figure 4.3).

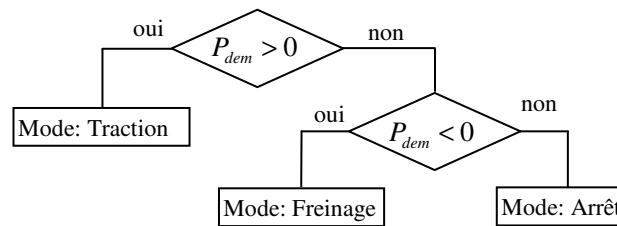


FIG. 4.3 – Algorithme de commande en ligne, définition des modes

##### 4.2.2.1 Mode « arrêt »

Le véhicule est considéré en mode « arrêt » dans notre cas si la puissance demandée par le moteur de traction électrique est nulle. Dans ce cas, les puissances fournies par la pile à combustible,  $P_{PAC}$ , et l'élément de stockage,  $P_{ES}$ , sont considérées nulles. A noter que nous ne tenons compte que de la puissance nécessaire à la traction vu que pratiquement la pile



à combustible fournit toujours une puissance non nulle servant à alimenter, entre autres, ses auxiliaires.

#### 4.2.2.2 Mode « freinage »

Le véhicule est en mode freinage si la puissance demandée  $P_{dem}$  est négative tenant compte de la convention de signe utilisée pour différencier la traction du freinage. Dans ce cas, la puissance fournie par la pile à combustible est nulle et l'élément de stockage absorbe la puissance de freinage tout en respectant les contraintes sur la puissance maximale pouvant être absorbée ainsi que l'énergie maximale pouvant être stockée (figure 4.4). L'expression  $E(P_S)$  figurant dans l'algorithme de la figure 4.4 désigne l'état d'énergie obtenu en absorbant la puissance  $P_S$ . Nous conservons par là les mêmes notations utilisées dans les chapitres précédents où  $P_{ES}$  désigne la puissance utile de l'élément de stockage au niveau du bus continu alors que  $P_S$  représente la puissance réellement absorbée ou fournie par cet élément en tenant compte des pertes dans cet élément. Enfin  $E_{act}$  désigne l'état d'énergie actuel de l'élément de stockage.

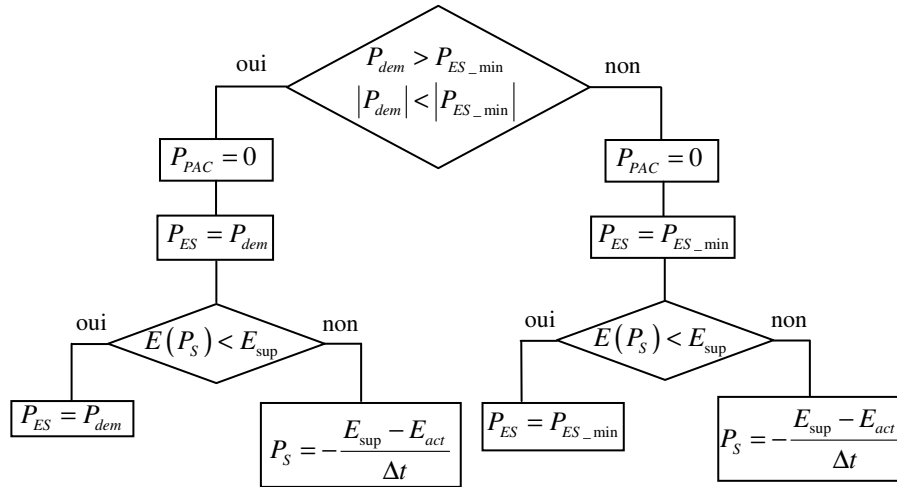


FIG. 4.4 – Algorithme de commande en ligne, mode freinage

#### 4.2.2.3 Mode « traction »

Si la puissance demandée,  $P_{dem}$ , est inférieure à la limite inférieure de puissance,  $P_{PAC\_inf}$ , la puissance fournie par la pile est dans ce cas égale à  $P_{PAC\_inf}$  alors que le reste de puissance de la pile est stocké dans l'élément de stockage. Par contre, si l'élément de stockage ne peut

plus stocker l'énergie, c.-à-d. a atteint sa limite supérieure  $E_{sup}$ , il est préférable que ce dernier fournisse la puissance demandée alors que la pile reste en « arrêt ». (figure 4.5).

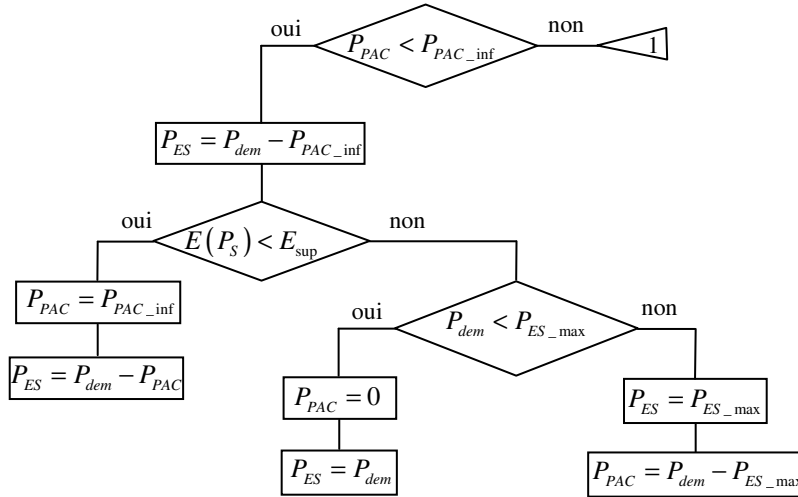


FIG. 4.5 – Algorithme de commande en ligne, mode traction

D'autre part, si la puissance demandée,  $P_{dem}$ , est supérieure à la limite inférieure,  $P_{PAC\_inf}$ , alors la puissance  $P_{PAC}$  est égale à  $P_{PAC\_inf}$  et le reste de puissance demandée est assuré par l'élément de stockage. Or si l'état d'énergie de l'ES dépasse la limite inférieure,  $E_{inf}$  alors la puissance  $P_S$  est fixée à la limite admissible  $(-(E_{inf} - E_{act}) / \Delta t)$  et la puissance  $P_{PAC}$  assure dans ce cas le reste,  $P_{dem} - P_{ES}$ . Si enfin  $P_{dem} - P_{ES}$  dépasse la limite supérieure fixée,  $P_{PAC\_sup}$ ,  $P_{PAC}$  sera égal à  $P_{PAC\_sup}$  sachant que dans ce cas la puissance demandée n'est pas toute assurée. (figure 4.6).

Enfin, le cas où la puissance demandée,  $P_{dem}$ , est supérieure à la limite inférieure,  $P_{PAC\_inf}$ , et  $P_{dem} - P_{PAC\_inf}$  dépasse la puissance maximale admissible par l'élément de stockage,  $P_{ES\_max}$ , est évoqué dans la figure 4.7.

En résumé, l'algorithme tend à faire fonctionner la pile majoritairement à une puissance  $P_{PAC\_inf}$  fixée. La puissance de la pile est cependant autorisée à augmenter afin de satisfaire une demande de puissance que l'élément de stockage n'arrive pas à satisfaire en respectant les contraintes. Il est nécessaire de préciser par là qu'il existe des cas où ni la pile ni l'élément de stockage n'arrivent ensemble à satisfaire une certaine demande instantanée de puissance. Ces cas sont désignés dans l'algorithme déjà exposé par l'expression «  $P_{dem}$  non assurée » et seront quantifiés par la valeur d'une erreur de puissance  $e(t)$  égale à la différence entre la puissance

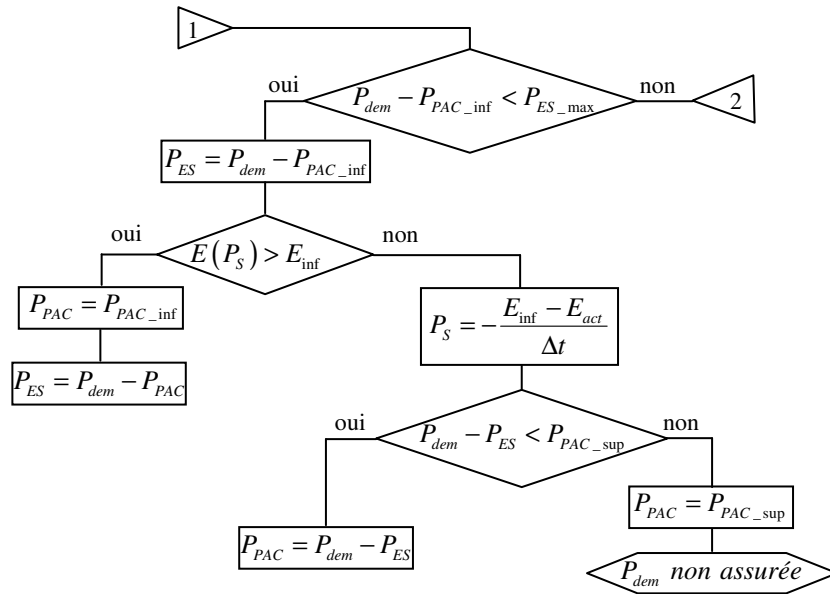


FIG. 4.6 – Algorithme de commande en ligne, mode traction (suite)

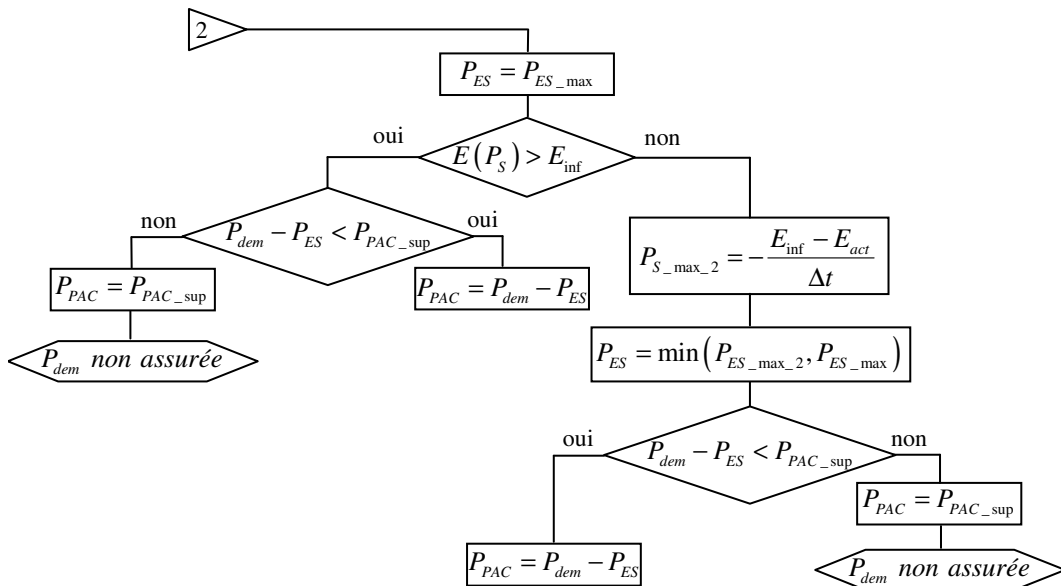


FIG. 4.7 – Algorithme de commande en ligne, mode traction (suite)

demandée,  $P_{dem}$  et la puissance réellement fournie  $P_{four}$  telle que :

$$e(t) = P_{dem}(t) - P_{four}(t) \quad (4.1)$$

où :

$$P_{four}(t) = P_{PAC}(t) + P_{ES}(t) \quad (4.2)$$

### 4.2.3 Choix des paramètres de réglage

L'algorithme présenté offre 4 degrés de liberté comme nous l'avons déjà évoqué, à savoir  $E_{sup}$ ,  $E_{inf}$ ,  $P_{PAC\_sup}$  et  $P_{PAC\_inf}$ . Restreindre la fourchette autour de l'état d'énergie initial aura l'effet de maintenir l'état de charge dans une fourchette acceptable pour garantir que cet élément n'est ni saturé afin de pouvoir stocker d'éventuelles énergies récupérées ni épuisé pour pouvoir fournir de l'énergie nécessaire face à de futures demandes. En revanche, restreindre la fourchette d'énergie limite la capacité de l'élément de stockage et par suite la performance de l'algorithme. Un compromis doit être ainsi fait dans le choix de cette fourchette et qui reste en étroite dépendance avec la nature du parcours suivi par le véhicule.

D'autre part, le choix de la fourchette de  $P_{PAC}$  notamment de la limite inférieure  $P_{PAC\_inf}$  est aussi un élément critique. Une première réflexion nous mène à choisir la valeur de  $P_{PAC\_inf}$  égale à la valeur moyenne obtenue avec l'application de l'algorithme de programmation dynamique sur les profils de missions prédéfinis. la figure 4.8 montre les valeurs de  $P_{PAC}$  optimales obtenues avec l'algorithme de programmation dynamique marquées sur la courbe de rendement de la pile pour les deux profils de mission étudiés. Les valeurs choisies pour  $P_{PAC\_inf}$  sont dans ce cas égales à 6 kW dans le cas du profil INRETS et 9 kW pour le profil ESKISEHIR.

L'évolution de l'état de charge de l'ES dans la fourchette limitée par  $E_{sup} = 1200kW.s$  et  $E_{inf} = 600kW.s$  le long du profil INRETS ainsi que l'erreur de puissance instantanée,  $e(t)$ , sont montrés dans la figure 4.9. La figure 4.10 montre les résultats de l'algorithme avec le profil ESKISEHIR.

Une seconde approche consiste à choisir comme valeur de  $P_{PAC\_inf}$  la puissance correspondant au rendement maximal de la pile à combustible qui est dans notre cas égale à 22 kW. Les

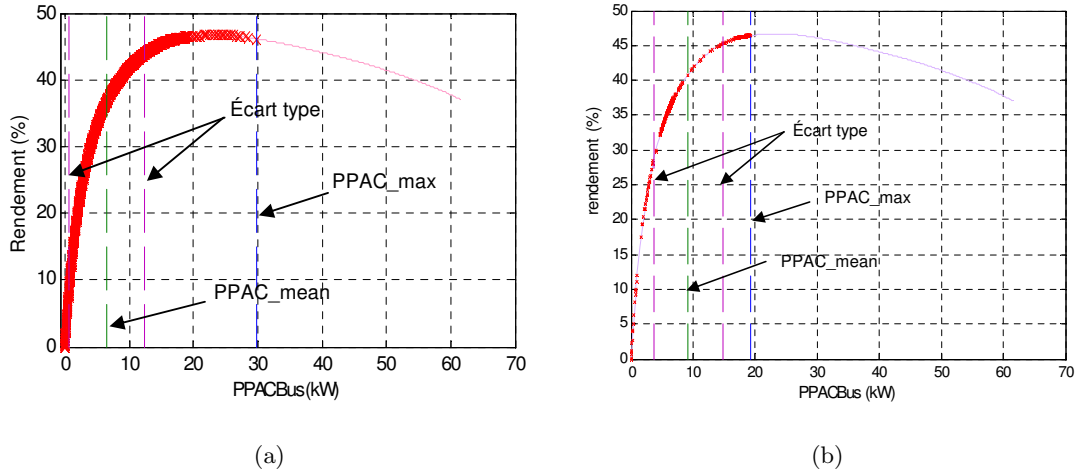


FIG. 4.8 – Valeurs de  $P_{PAC}$  optimales obtenues avec l’algorithme de programmation dynamique marquées sur la courbe de rendement de la pile pour les deux profils de mission étudiés : (a) INRETS; (b) ESKISEHIR

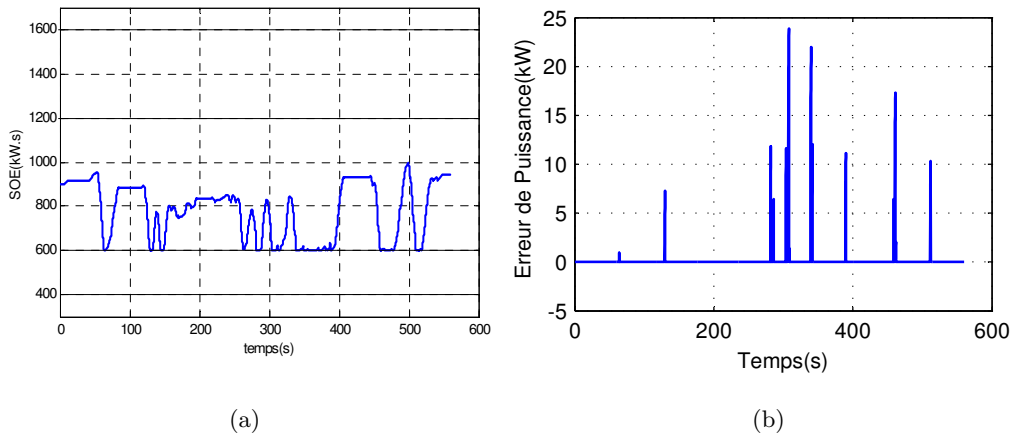


FIG. 4.9 – Résultats de l’algorithme en ligne pour  $P_{PAC\_inf} = 6kW$  appliqué au profil INRETS (a) Evolution de l’état de charge de l’élément de stockage; (b) Erreur entre la puissance demandée et la puissance réellement fournie

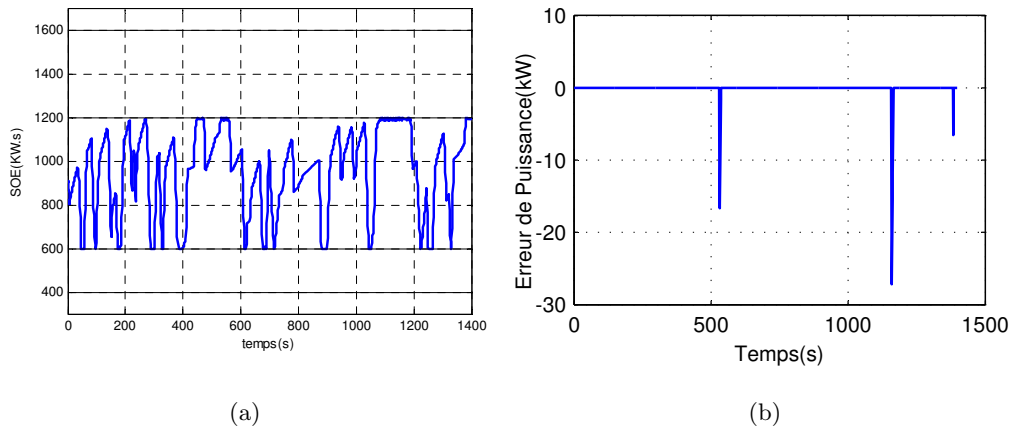


FIG. 4.10 – Résultats de l’algorithme en ligne pour  $P_{PAC\_inf} = 9kW$  appliqué au profil ESKI-SEHIR (a) Evolution de l’état de charge de l’élément de stockage ; (b) Erreur entre la puissance demandée et la puissance réellement fournie

résultats obtenues avec ce choix sont représentés dans les figures 4.11 et 4.12.

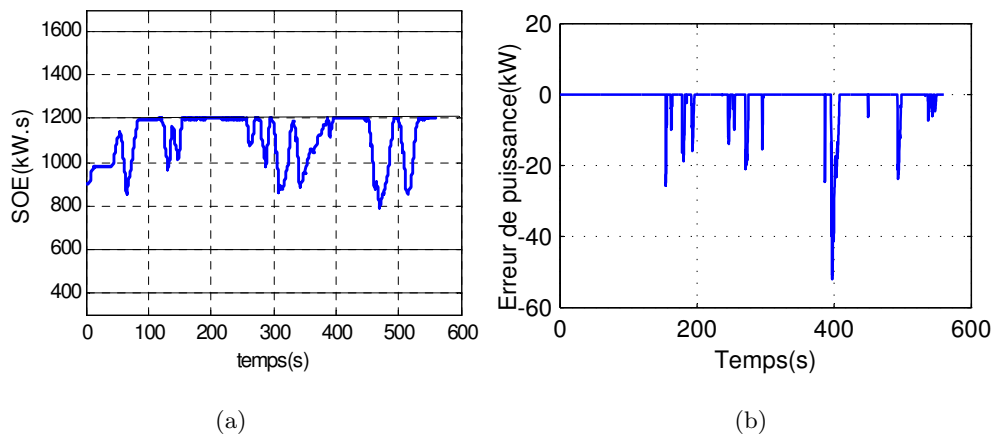


FIG. 4.11 – Résultats de l’algorithme en ligne pour  $P_{PAC\_inf} = 22kW$  appliqué au profil IN-RETS (a) Evolution de l’état de charge de l’élément de stockage ; (b) Erreur entre la puissance demandée et la puissance réellement fournie

Enfin le tableau 4.1 regroupe la consommation totale en kW.s ainsi que l’erreur en puissance évaluées sur les deux profils avec les deux choix de fourchette de puissance. L’énergie d’hydrogène consommée sera exprimée en pourcentage par rapport à l’énergie consommée dans le cas où la pile seule fournit la totalité de la puissance demandée. Cette consommation est de même comparée à celle issue de l’application de l’algorithme de programmation dynamique.

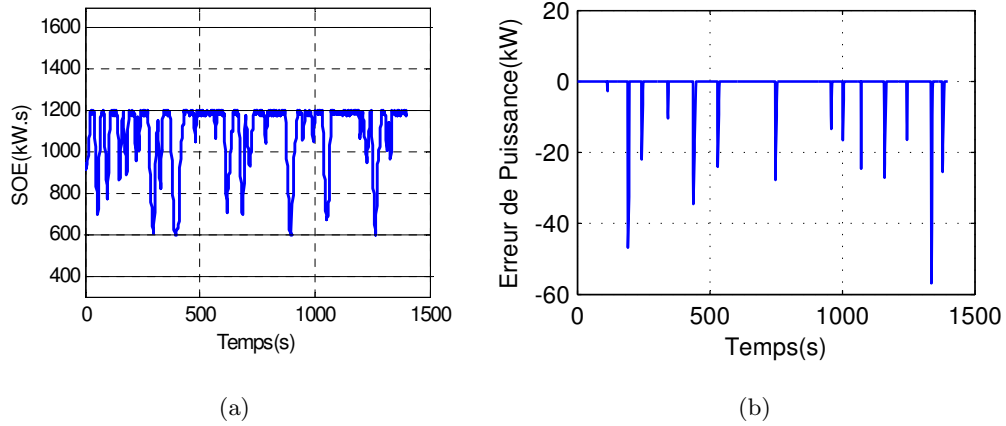


FIG. 4.12 – Résultats de l’algorithme en ligne pour  $P_{PAC\_inf} = 22kW$  appliqué au profil ESKISEHIR (a) Evolution de l’état de charge de l’élément de stockage; (b) Erreur entre la puissance demandée et la puissance réellement fournie

TAB. 4.1 – Consommation d’hydrogène et erreur de puissance obtenues avec l’algorithme de commande en ligne

Profil	Méthode	$[E_{inf}, E_{sup}]$	$[P_{PAC\_inf}, P_{PAC\_sup}]$	Consom.	Erreur quadr. moyenne
Inrets	A. Enligne	[600, 1200]	[6, 60]	40 %	1,59 kW
Inrets	A. Enligne	[600, 1200]	[22, 60]	34 %	5,15 kW
Inrets	P.D.			38.28 %	0
Eskisehir	A. Enligne	[600, 1200]	[9, 60]	33.2 %	1,48 kW
Eskisehir	A. Enligne	[600, 1200]	[22, 60]	34 %	4,91 kW
Eskisehir	P.D.			33.75 %	0

#### 4.2.4 Résultats et observations

En observant les résultats obtenus avec les deux choix de fourchette de puissance, nous constatons que, ni la puissance moyenne obtenue avec l'algorithme de programmation dynamique, ni la puissance correspondant au rendement maximal de la pile à combustible forment le choix idéal pour la valeur de  $P_{PAC\_inf}$ . En effet, il existe une valeur de puissance comprise entre ces deux valeurs et qui sera la plus adéquate. Cette valeur dépend donc de la fourchette choisie sur l'état d'énergie de l'élément de stockage d'une part et d'autre part sur le profil de mission effectué. Cela dit, pour une puissance  $P_{PAC}$  moyenne faible, l'état d'énergie de l'élément de stockage atteint souvent sa borne inférieure limitant sa capacité à satisfaire les pics de puissance demandée. En revanche, si cette puissance est assez élevée, l'élément de stockage est souvent saturé limitant sa capacité de stocker d'éventuelles énergies de freinage récupérées.

Dans tous les cas, avec uniquement ces deux fourchettes, nous ne pouvons pas garantir toute la demande de puissance sauf dans un cas de surdimensionnement. En outre le choix arbitraire de cette limite inférieure de  $P_{PAC}$  n'est pas une tâche facile ni généralisée pour tout type de profil de mission vu que par hypothèse nous travaillons en ligne sans connaissance préalable de la future demande de puissance. D'autre part, le profil de puissance  $P_{PAC}$  généré par cet algorithme comme montré dans la figure 4.13, présente des variations brusques mettant en question la capacité de la pile à répondre à une telle dynamique de demande de puissance.

Pour résumer, il serait ainsi judicieux de diviser l'espace de puissance et d'énergie en plusieurs niveaux augmentant la performance et la robustesse de l'algorithme. Il est aussi préférable de ne pas faire subir à la pile des sauts brusques. Avec ces observations, le passage à la logique floue nous semble un choix approprié présentant une solution à ces observations de part la divisions des entrées et sorties du système en plusieurs niveaux appelés fonctions d'appartenance et d'autre part avec le chevauchement de ces fonctions assurant une certaine souplesse à la solution.

### 4.3 Système de décision à base de règles floues

La logique floue est une théorie qui a connu un grand engouement depuis que Zadeh [Zad65] a introduit le concept de sous-ensembles flous en 1965. Elle présente en effet l'avantage d'utiliser des règles linguistiques simples permettant de traduire facilement le savoir faire d'un expert pour



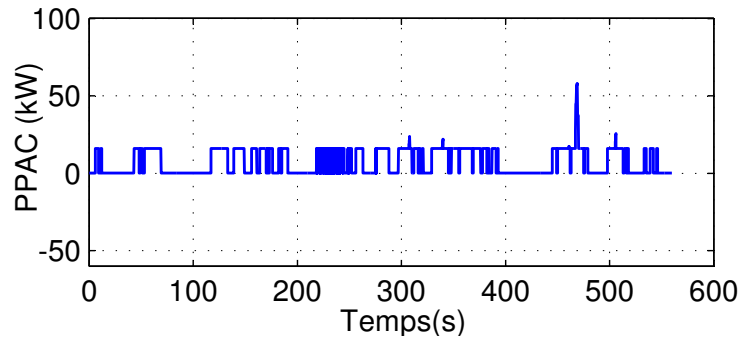


FIG. 4.13 – Profil de puissance  $P_{PAC}$  généré par l'algorithme de commande en ligne

répondre à une problématique spécifique. [Fau06].

La notion de logique floue permet d'étendre la notion de logique classique, associée aux variables booléennes ne prenant que deux valeurs 0 et 1. Il est alors possible d'associer à des variables des coefficients d'appartenance à des sous-ensembles flous prenant des valeurs dans l'intervalle  $[0, 1]$  et quantifiant l'incertitude sur la variable. Un évènement certain pour la variable se traduira par un coefficient d'appartenance au sous-ensemble flou, c'est-à-dire à la propriété, égal à 1 alors que la valeur sera inférieure à 1 en présence d'incertitudes. Il vient alors qu'une valeur nulle pour un coefficient d'appartenance indique que la possibilité d'appartenance au sous-ensemble sélectionné de la variable représentant la grandeur concernée est complètement rejetée. L'univers de discours d'une variable donnée, c'est-à-dire son domaine de variation, peut alors être divisé en plusieurs sous-ensembles au moyen de fonctions d'appartenance.

Il est nécessaire de préciser que plusieurs méthodes se basent sur la théorie de la logique floue. Le réglage (ou la commande) de processus industriels par logique floue, marqué par les travaux de Mamdani [MA75] et Sugeno est devenu un des domaines d'application de la logique floue les plus prometteurs. L'algorithme utilisé dans notre étude est plus précisément un système de décision à base de règles floues qu'un régulateur par logique floue. Si ce dernier reçoit à son entrée une grandeur de consigne et une ou plusieurs grandeurs mesurées pour fournir un signal de commande suivant un ensemble prédéfini de règles, le système que nous avons appliqué, quant à lui, utilise ces règles pour quantifier la valeur d'une ou plusieurs variables de sortie en fonction de la valeur des variables d'entrées. Cependant les deux méthodes sont basées sur les mêmes principes et le système implanté présente une structure semblable.

L'application des stratégies de contrôle des véhicules électriques hybrides à base de logique floue est un sujet de grand intérêt dans les recherches actuelles académiques ou industrielles. Des stratégies floues conventionnelles [LKSK00] aux stratégies floues adaptatives [LW05] [WL05], les objectifs visés ainsi que les organes contrôlés aussi bien que les variables de commande utilisées diffèrent d'une stratégie à l'autre. A titre d'exemple, dans [LKSK00], une stratégie de commande est utilisée afin de minimiser les émissions de  $NO_x$  alors que dans [BWGR00] la stratégie implantée tend à forcer le moteur à combustion interne à travailler autour de son point de rendement maximal.

Pour des applications de la commande floue dans les systèmes hybrides à pile à combustible précisément, des études récentes traitent différents aspects de la chaîne de traction. Dans [THPK06], un contrôleur de type PD+I flou est étudié pour régler le débit d'air du circuit d'alimentation et un superviseur flou est utilisé pour la détermination de la consigne de ce circuit. Dans [KUA06] et [KUA07] un contrôleur flou est utilisé dans le but de régler le rapport cyclique du convertisseur DC-DC correspondant à la pile à combustible et du convertisseur bidirectionnel associé à l'élément de stockage. Dans [YZZ06] un contrôleur flou est introduit dans le modèle de freinage régénératif dans le cas d'un bus à pile à combustible afin de recycler convenablement l'énergie de freinage récupérée.

Le système de décision à base de règles floues, adopté dans notre cas, sert à identifier la puissance instantanée à fournir par la pile à combustible pour un état de charge donné des supercapacités et une puissance de traction demandée.

A l'exemple de notre étude, nous trouvons des applications de gestion d'énergie concernant des architectures hybrides parallèles dans lesquelles la logique floue est utilisée dans un système de décision. Dans [ZH07], un contrôleur flou est utilisé pour caractériser l'angle d'ouverture des papillons du moteur à combustion interne en fonction de l'état de charge des batteries et du couple de traction demandé. Dans [ZCWW06], la puissance débitée par la batterie est choisie en fonction de la puissance demandée et l'état de charge de l'élément de stockage en utilisant une méthode statistique basée sur les résultats d'un algorithme de programmation dynamique. Dans [WY06a], le système de décision flou sert de même à trouver la puissance de la batterie en

fonction de la puissance demandée et l'état de charge de l'élément de stockage.

Dans la section suivante, nous allons évoquer rapidement le principe de logique floue avant d'aborder la structure du système de décision à base de règles d'inférences floues adopté dans notre étude. Pour des informations plus complètes et précises on peut se référer à des ouvrages dédiés à la logique floue [Buh94], [BFR98], [His98].

### 4.3.1 Principe de la méthode

La figure 4.14 montre la configuration interne d'un système de décision à base de logique floue. Cette configuration met en évidence trois blocs principaux, à savoir le bloc « fuzzification », le bloc « mécanisme d'inférence » et le bloc « défuzzification ».

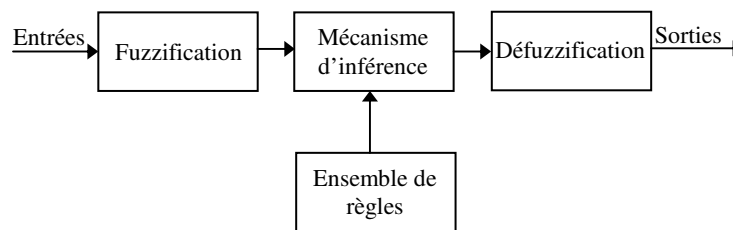


FIG. 4.14 – Configuration interne du système de décision à base de logique floue

La fuzzification proprement dite consiste à définir les fonctions d'appartenance pour les différentes variables d'entrée et de sortie. On réalise ainsi le passage des grandeurs physiques en variables linguistiques qui peuvent être traitées par les inférences. Elle permet d'associer à chacune des variables réelles, par le biais des fonctions d'appartenances, un degré d'appartenance pour chacun des sous-ensembles flous définis sur l'univers de discours. Il existe de nombreux types de fonctions d'appartenance comme par exemple des fonctions de type triangulaire, trapézoïdal, gaussienne pour n'en citer que quelques unes.

Le mécanisme d'inférence est basé sur un ensemble défini de règles. Ces règles de type : Si..., Alors... permettent de passer des degrés d'appartenance des grandeurs d'entrées aux degrés d'appartenance aux sous ensembles flous des variables de sortie. Ce mécanisme d'inférence va nous permettre donc de générer une conclusion à partir des entrées et des règles actives.

Enfin, le dernier bloc, l'interface de défuzzification, va permettre de transformer les degrés d'appartenance des sous-ensembles flous de commande en grandeur numérique. C'est la transformation inverse du module de fuzzification. Plusieurs méthodes permettent de réaliser l'étape de défuzzification. La méthode du centre de gravité est l'un des moyens les plus simples et les plus utilisés. Elle consiste à rechercher le centre de gravité d'un système de sous-ensembles flous dont les poids sont leurs coefficients d'appartenance.

### 4.3.2 Mise en oeuvre du système flou

Le système de décision flou mis en oeuvre utilise deux variables d'entrées qui sont l'état d'énergie ou de charge de l'élément de stockage,  $E$ , et la puissance de traction demandée,  $P_{dem}$ , la variable de sortie du système étant la puissance fournie par la pile à combustible,  $P_{PAC}$ . L'univers de discours de chacune de ces variables est défini par les contraintes de dimensionnement en puissance et énergie.

#### 4.3.2.1 Choix des fonctions d'appartenances

L'univers de discours de chacune de ces variables est divisé en plusieurs classes ou sous-ensembles. Chacun de ces sous ensembles décrit un état de la variable désignée. L'état de charge de l'élément de stockage peut ainsi être « assez faible » (AF), « faible » (F), « moyen » (M) ou « élevé » (E). De même, la puissance demandée peut être considérée comme « négative » (N), « assez faible », « faible », « moyenne » ou « élevée ». Enfin, la puissance fournie par la pile à combustible pour être « nulle » (N), « assez faible », « faible », « moyenne » ou « élevée ». Chacun de ces ensembles flous est désigné par une fonction d'appartenance qui attribue à une valeur,  $x$ , donnée de la variable désignée  $\vartheta$ , un degré d'appartenance à cet ensemble flou,  $EF$ . Ce degré d'appartenance peut être ainsi représenté par  $\mu_{EF}(x)$ . A cet égard, nous avons choisi des fonctions d'appartenance de type trapézoïdal pour désigner chacun des ensembles flous répartis sur l'univers de discours des variables de notre système.

La figure 4.15 représente les fonctions d'appartenance de la variable d'entrée représentant l'état de charge de l'élément de stockage qui s'étalent sur l'univers de discours limité par les contraintes sur l'énergie,  $E_{max} = 1600kW.s$  et  $E_{min} = 400kW.s$ . Le principe de fuzzification et le concept des fonctions d'appartenance est illustré dans l'exemple de la figure 4.16. Un état de charge de 800 kW.s appartient avec un degré d'appartenance de 0,28 à l'ensemble

« faible » et avec un degré de 0,82 à l'ensemble « moyen ». Explicitement, nous pouvons écrire  $\mu_{faible}(\vartheta = 800) = 0,28$  et  $\mu_{moyen}(\vartheta = 800) = 0,82$  sachant que  $\mu_{élevé}(\vartheta = 1300) = 1$ . Les fonctions d'appartenance choisies pour  $P_{dem}$  et  $P_{PAC}$  sont montrées respectivement dans les figures 4.17 et 4.18.

Nous avons choisi les fonctions d'appartenance de type trapézoïdal vu que c'est la forme la plus utilisée avec la forme triangulaire et la plus facile à implanter. De plus, la fonction triangulaire peut être considérée comme un cas spécial de la fonction trapézoïdale dans laquelle deux des quatre sommets coïncident. Le recours à des fonctions plus sophistiquées de formes de cloche par exemple ou de formes personnalisées formées par des morceaux de droites ajoute une complexité non utile ou justifiable dans le cadre de notre étude. D'autre part, le choix du nombre de fonctions d'appartenance et de l'emplacement des points caractérisant l'allure de ces fonctions pour chacune des variables est un choix arbitraire basé sur l'expertise acquise vis-à-vis du système, une expertise consolidée par la recherche bibliographique d'une part et d'autre part par une phase de simulation par essai/erreur. Il est enfin nécessaire de préciser que le choix de ces fonctions d'appartenance est en étroite relation avec l'ensemble des règles d'inférence caractérisant le système de décision en reliant les entrées du système à la sortie unique.

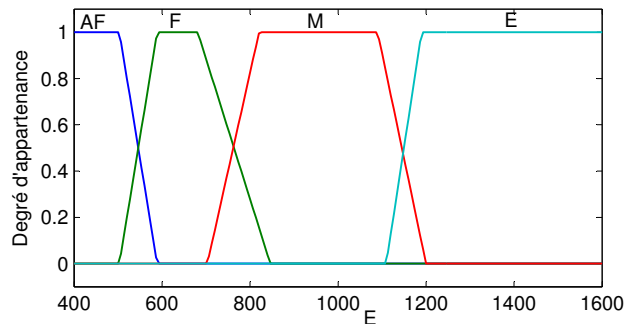


FIG. 4.15 – Univers de discours et fonctions d'appartenance de la variable d'entrée,  $E$

#### 4.3.2.2 Choix des règles d'inférences

La stratégie de réglage dépend essentiellement des inférences adoptées. Elles lient les grandeurs mesurées qui sont les variables d'entrées transformées en variables linguistiques à l'aide de la fuzzification à la variable de sortie, cette dernière étant également exprimée comme variable linguistique. Nous pouvons décrire l'inférence d'une manière explicite par la description

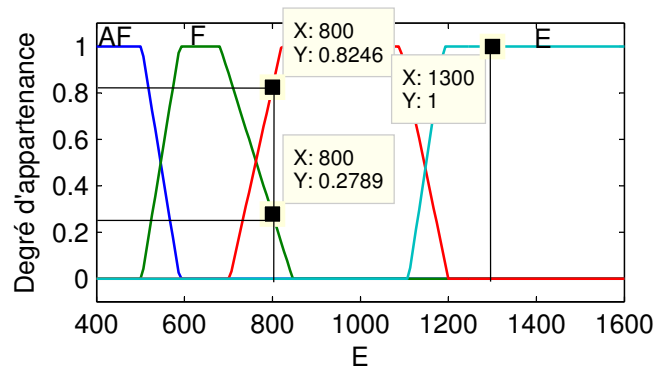


FIG. 4.16 – Degrés d'appartenance aux ensembles flous d'une valeur donnée de la variable d'entrée,  $E$

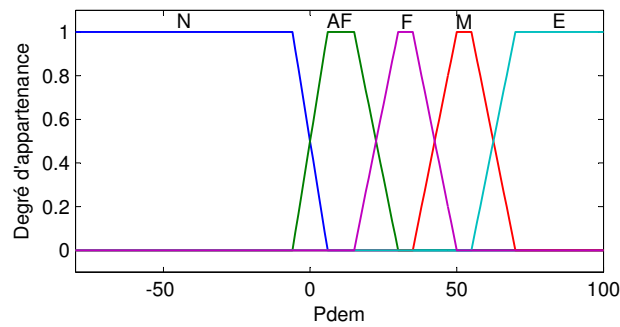


FIG. 4.17 – Univers de discours et fonctions d'appartenance de la variable d'entrée,  $P_{dem}$

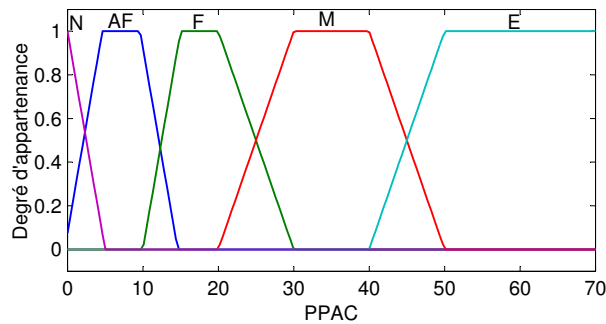


FIG. 4.18 – Univers de discours et fonctions d'appartenance de la variable de sortie,  $P_{PAC}$

linguistique à l'aide d'un certain nombre de règles. Chaque règle possède une condition précédée du symbole **SI** et une conclusion, action ou opération, précédée du symbole **ALORS**. La description linguistique de l'inférence adoptée dans notre système de décision est la suivante :

<b>SI</b> $P_{dem}$ est « négative »		<b>ALORS</b> $P_{PAC}$ est « nulle »	<b>OU</b>
<b>SI</b> $P_{dem}$ est « assez faible »	<b>ETE</b> est « assez faible »	<b>ALORS</b> $P_{PAC}$ est « moyenne »	<b>OU</b>
<b>SI</b> $P_{dem}$ est « assez faible »	<b>ETE</b> est « faible »	<b>ALORS</b> $P_{PAC}$ est « faible »	<b>OU</b>
<b>SI</b> $P_{dem}$ est « assez faible »	<b>ETE</b> est « moyenne »	<b>ALORS</b> $P_{PAC}$ est « assez faible »	<b>OU</b>
<b>SI</b> $P_{dem}$ est « assez faible »	<b>ETE</b> est « élevée »	<b>ALORS</b> $P_{PAC}$ est « assez faible »	<b>OU</b>
<b>SI</b> $P_{dem}$ est « faible »	<b>ETE</b> est « assez faible »	<b>ALORS</b> $P_{PAC}$ est « élevée »	<b>OU</b>
<b>SI</b> $P_{dem}$ est « faible »	<b>ETE</b> est « faible »	<b>ALORS</b> $P_{PAC}$ est « moyenne »	<b>OU</b>
<b>SI</b> $P_{dem}$ est « faible »	<b>ETE</b> est « moyenne »	<b>ALORS</b> $P_{PAC}$ est « faible »	<b>OU</b>
<b>SI</b> $P_{dem}$ est « faible »	<b>ETE</b> est « élevée »	<b>ALORS</b> $P_{PAC}$ est « faible »	<b>OU</b>
<b>SI</b> $P_{dem}$ est « moyenne »	<b>ETE</b> est « assez faible »	<b>ALORS</b> $P_{PAC}$ est « élevée »	<b>OU</b>
<b>SI</b> $P_{dem}$ est « moyenne »	<b>ETE</b> est « faible »	<b>ALORS</b> $P_{PAC}$ est « moyenne »	<b>OU</b>
<b>SI</b> $P_{dem}$ est « moyenne »	<b>ETE</b> est « moyenne »	<b>ALORS</b> $P_{PAC}$ est « faible »	<b>OU</b>
<b>SI</b> $P_{dem}$ est « moyenne »	<b>ETE</b> est « élevée »	<b>ALORS</b> $P_{PAC}$ est « très faible »	<b>OU</b>
<b>SI</b> $P_{dem}$ est « élevée »	<b>ETE</b> est « assez faible »	<b>ALORS</b> $P_{PAC}$ est « élevée »	<b>OU</b>
<b>SI</b> $P_{dem}$ est « élevée »	<b>ETE</b> est « faible »	<b>ALORS</b> $P_{PAC}$ est « moyenne »	<b>OU</b>
<b>SI</b> $P_{dem}$ est « élevée »	<b>ETE</b> est « moyenne »	<b>ALORS</b> $P_{PAC}$ est « faible »	<b>OU</b>
<b>SI</b> $P_{dem}$ est « élevée »	<b>ETE</b> est « élevée »	<b>ALORS</b> $P_{PAC}$ est « faible »	<b>OU</b>

Une simplification des inférences s'obtient à l'aide d'une représentation graphique appelée matrice d'inférence comme montré dans le tableau 4.2. A l'intersection d'une colonne et d'une ligne liées aux ensembles des variables d'entrée se trouve l'ensemble correspondant de la variable de sortie. Il faut préciser que la représentation des règles d'inférences au travers d'une matrice d'inférence est envisageable vu qu'il s'agit de règles ou un « OU » logique est sous-entendu entre les règles.

Le choix de ces règles traduit la logique adoptée vis-à-vis du fonctionnement du groupe électrogène hybride. L'idée générale derrière ces règles est que la pile à combustible fournit d'autant plus de puissance que la puissance demandée en est élevée et / ou que l'état de charge de l'élément de stockage en est faible. De même que la pile fournit une puissance aussi faible

TAB. 4.2 – Matrice d’inférence du système de décision flou

$P_{PAC}$		$P_{dem}$				
		AF	F	M	E	N
$E$	AF	M	E	E	E	N
	F	F	M	M	M	N
	M	AF	AF	F	F	N
	E	AF	AF	AF	F	N

que la demande en puissance en est faible ou que l’élément de stockage est assez chargé pour fournir cette demande en puissance. Partant de cette idée générale, le choix de ces règles reste un choix arbitraire qui tend à assurer un passage continu de la puissance de son état élevé à son état assez faible en utilisant les états intermédiaires. Il faut de plus préciser que la première règle utilisée qui impose à la pile à combustible une puissance nulle ou plutôt négligeable lorsque la puissance demandée est négative reste une hypothèse de simplification puisqu’en réalité la pile peut fournir de la puissance qui va être absorbée par l’élément de stockage en parallèle à la puissance de freinage récupérée.

#### 4.3.2.3 Traitement numérique des inférences

Dans les règles précédemment décrites, interviennent les opérateurs **ET** et **OU**. L’opérateur **ET** s’applique aux variables à l’intérieur d’une règle alors que l’opérateur **OU** lie les différentes règles. A cause de l’empiètement des fonctions d’appartenance, en général deux ou plusieurs règles sont activées en même temps . Ce fait doit être pris en considération lors de la réalisation de l’opérateur **OU** [Buh94]. Une méthode d’inférence doit être utilisée permettant le traitement numérique des différents opérateurs dans cette inférence. L’idée générale est d’obtenir une certaine allure de la fonction d’appartenance résultante de la variable de sortie à partir de certaines valeurs pour les fonctions d’appartenance des variables d’entrées. La méthode d’inférence « max-min » est utilisée dans notre cas. La conclusion dans chaque règle lie le degré d’appartenance de la variable de sortie par l’opérateur **ET** alors réalisé par la formation du minimum. Enfin, l’opérateur **OU** qui lie les différentes règles est réalisé par la formation du maximum. La figure 4.19 représente graphiquement le principe de la méthode d’inférence « max-min ». Ce schéma traite l’exemple d’un système de deux règles liant deux variables d’entrées, x et y, à une variable



de sortie,  $z$ . L'allure de la fonction d'appartenance de la variable de sortie résultat de l'application de ces règles à deux valeurs données des variables d'entrée,  $x_1$  et  $y_1$ , est ainsi montrée. Cet exemple met en évidence le choix du degré d'appartenance minimal représentant l'opérateur **ET** qui vient affecter la fonction d'appartenance de la variable de sortie désignée dans chaque règle. L'opérateur **OU** reliant les deux règles est traité en choisissant le degré d'appartenance maximal à chacun des ensembles flous de la variable de sortie obtenue par l'application de chacune des deux règles.

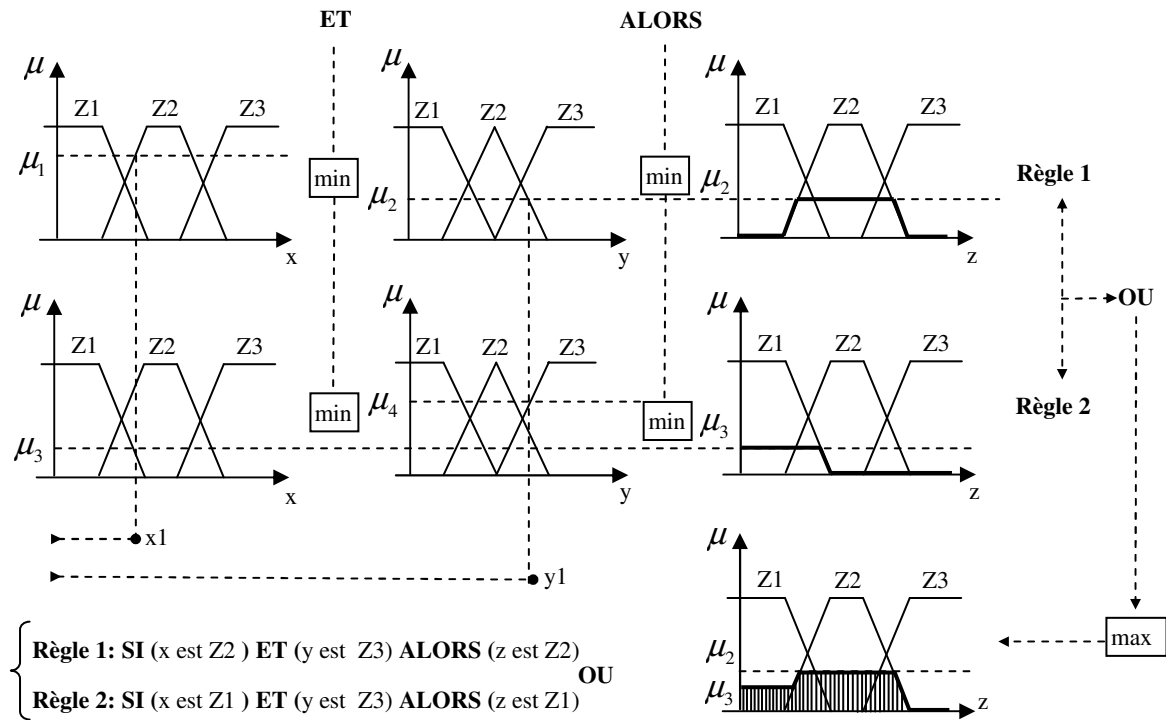


FIG. 4.19 – Méthode d'inférence max-min pour deux variables d'entrée et deux règles

Étant donnée l'allure de la fonction d'appartenance résultante de la variable de sortie,  $\mu_{res}(z)$ , la dernière phase du traitement numérique des inférences est notamment la transformation de cette information floue en une valeur déterminée. C'est précisément la phase de « défuzzification », méthode inverse de la « fuzzification ». Concrètement, pour une valeur donnée des variables d'entrées, une valeur précise de la variable de sortie est ainsi fournie par le mécanisme d'inférence flou. Bien qu'il existe plusieurs méthodes de « défuzzification », nous allons utiliser la méthode la plus utilisée qui consiste à déterminer le centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante comme montré dans la figure 4.20. La valeur de la variable

de sortie résultante,  $z_{res}$  est ainsi l'abscisse de ce centre de gravité.

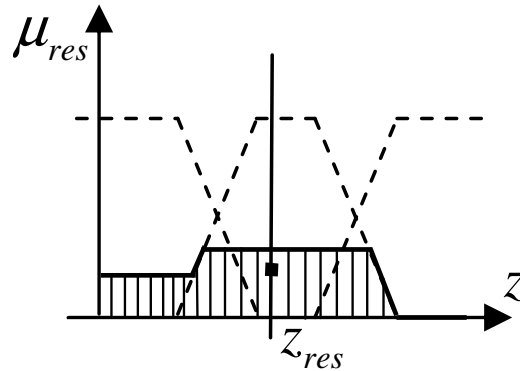


FIG. 4.20 – Méthode de défuzzification par calcul de l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante

Cela dit, le système d'inférence flou, caractérisé par les règles déjà évoquées liant les variables d'entrées à la variable de sortie moyennant les méthodes de traitement numériques choisies, permet ainsi d'attribuer à chaque couple de valeurs des variables d'entrées,  $P_{dem}$  et  $E$ , une valeur précise de la variable de sortie  $PPAC$ . L'ensemble de ces valeurs obtenu en évaluant le système sur la totalité de l'univers de discours des variables d'entrée et de sortie décrit une surface caractéristique du système flou comme montré dans la figure 4.21.

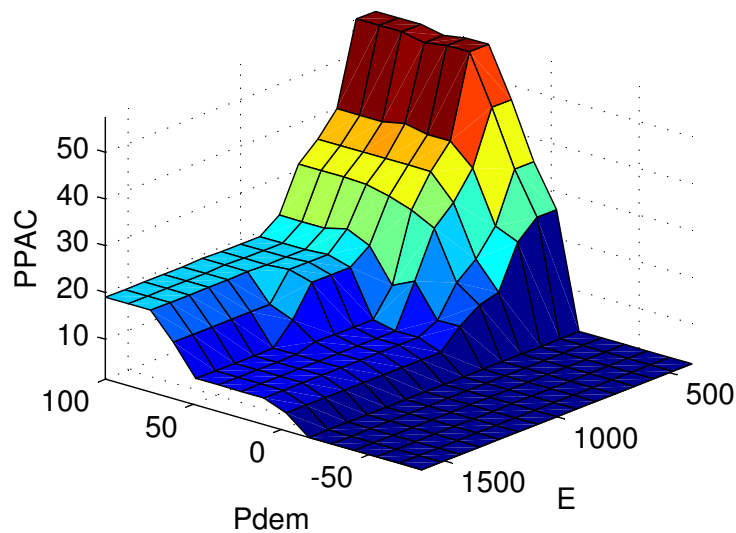


FIG. 4.21 – Surface caractéristique du système d'inférence évalué sur l'univers de discours des variables d'entrée et de sortie

### 4.3.3 Résultats et observations

La performance du système de décision flou ainsi élaboré est ensuite évaluée moyennant les deux profils de missions, INRETS et ESKISEHIR. L'énergie totale d'hydrogène consommée est donnée dans le tableau 4.3. Elle est aussi comparée à la consommation obtenue par l'application de l'algorithme de programmation dynamique (P.D.). L'amélioration apportée à la consommation d'hydrogène par l'application de l'algorithme flou par rapport à un fonctionnement sans élément de stockage est de même évaluée dans ce tableau. Le profil de puissance  $P_{PAC}$  généré par le système flou ainsi que la puissance  $P_{ES}$  correspondante sont montrés dans les figures 4.22 dans le cas du profil de mission INRETS et 4.23 celui du profil ESKISEHIR. Enfin l'évolution de l'état de charge le long des deux profils de mission est montrée dans la figure 4.24.

TAB. 4.3 – Consommation d'hydrogène obtenue par application de l'algorithme flou

Profil	Algorithme	Consommation	Amélioration
INRETS	P.D.	9 189,7 kW.s	38 %
	Flou	10 866 kW.s	27 %
ESKISEHIR	P.D.	31 826 kW.s	33,7 %
	Flou	33 358 kW.s	30,5%

L'observation des résultats obtenus montre que les objectifs visés par l'application de ce système flou sont généralement atteints, à savoir la robustesse et la souplesse. En effet, le système flou offre des résultats acceptables au niveau de la consommation en hydrogène tout en satisfaisant l'intégralité de la puissance demandée sur le temps de cycle total et cela pour les deux profils de mission considérés qui se traduit par une erreur de puissance nulle. D'autre part, les sauts de puissances que nous observions avec l'algorithme de base sont nettement diminués avec l'application du contrôleur flou. Il est certain qu'une étude plus précise peut être faite en étudiant la pente de puissance maximale que la pile à combustible peut subir,  $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{max}$ , ajoutant ainsi une contrainte supplémentaire aux méthodes de commande et d'optimisation utilisées.

Cependant, le calibrage de cet algorithme qui se traduit par le choix des règles d'inférences et de la position des points caractérisant les fonctions d'appartenance des entrées et sorties est une affaire délicate. Ce calibrage est jusque là basé sur l'expertise acquise vis-à-vis du système

accompagné d'une phase non négligeable d'essais et erreurs. Fixant les règles du système, les fonctions d'appartenance sont ainsi modifiées en prenant en considération le fait de limiter autant que possible l'utilisation de la puissance de la pile à combustible pour limiter la consommation mais aussi et surtout éviter les saturations sur l'état de charge de l'élément de stockage qui aura un effet direct à la fois sur la consommation et sur l'erreur de puissance. C'est une observation que nous avons déjà notée dans l'étude des limitations de l'algorithme de base. Cela dit, nul ne peut garantir l'optimalité de ce choix des paramètres de réglage sachant que l'amélioration des résultats sera proportionnelle au nombre d'essais effectués. Pour remédier à ce problème et ainsi limiter la durée de la phase d'essais, nous avons eu recours à un algorithme d'optimisation parfaitement adaptable à ce genre de situation, à savoir l'algorithme génétique qui sera le sujet d'étude de la section suivante.

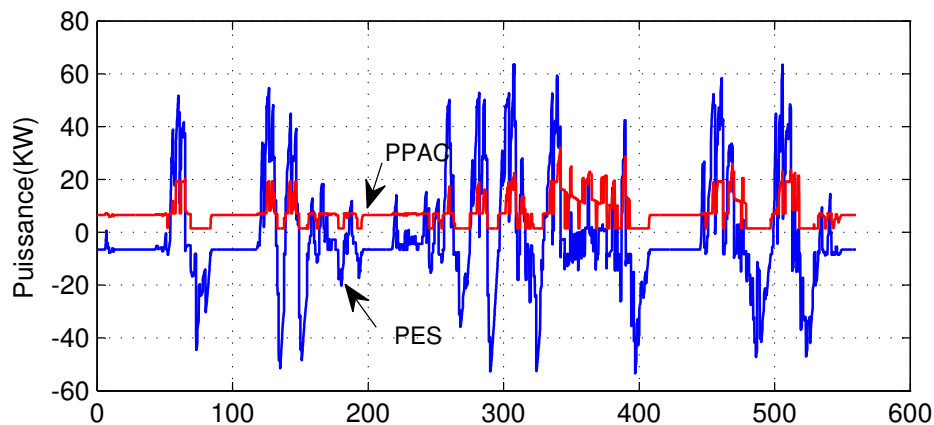


FIG. 4.22 – Profil de puissance  $P_{PAC}$  générée par l'algorithme flou et puissance  $P_{ES}$  correspondante dans le cas du profil de mission INRETS

#### 4.4 Optimisation du système d'inférence flou par l'application d'un algorithme génétique

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et de l'évolution naturelle : croisements, mutations, sélection, etc. Les algorithmes génétiques ont déjà une histoire relativement ancienne puisque les premiers travaux de John Holland sur les systèmes adaptatifs remontent à 1962 [Hol62]. L'ouvrage de David Goldberg [Gol89] a largement contribué à les vulgariser. Un algorithme génétique recherche le ou les

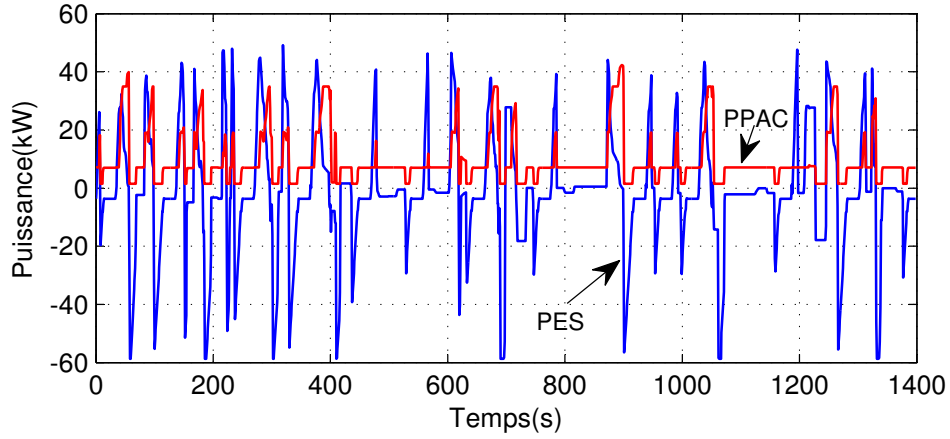


FIG. 4.23 – Profil de puissance  $P_{PAC}$  générée par l'algorithme flou et puissance  $P_{ES}$  correspondante dans le cas du profil de mission ESKISEHIR

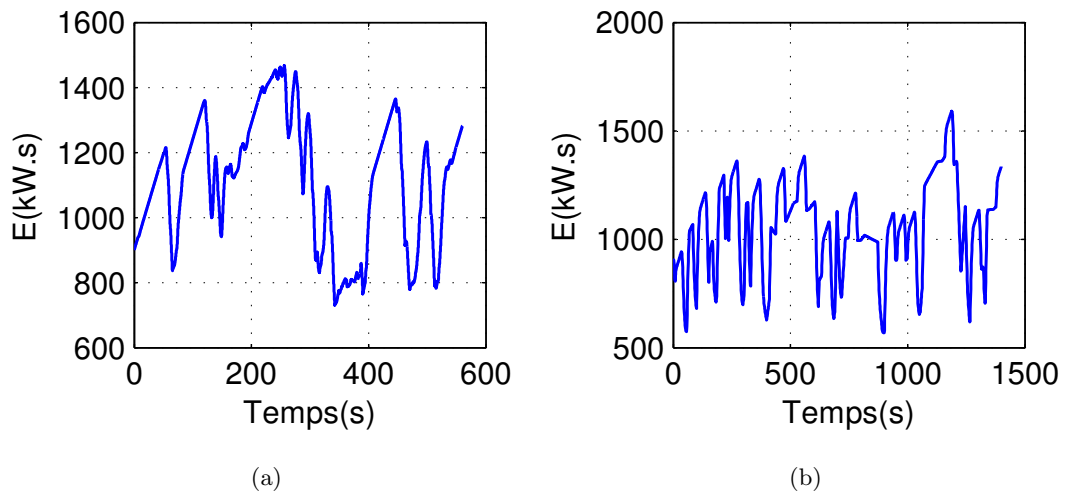


FIG. 4.24 – Evolution de l'état d'énergie de l'élément de stockage donné par l'algorithme flou dans le cas des profils de mission (a) INRETS ; (b) ESKISEHIR

extrema d'une fonction définie sur un espace de données.

L'application des algorithmes génétiques pour le réglage des contrôleurs flous a été adoptée dans les années 90 [NL94], [LN95a], [LN95b], [PK91]. Depuis, l'approche floue-génétique a été utilisée avec succès dans plusieurs applications électriques. A titre d'exemple, dans [MC01], une approche neuro-floue-génétique est adoptée pour le contrôle de systèmes électrochimiques complexes dans laquelle les réseaux de neurones sont utilisés pour la modélisation du processus électrochimique, la logique floue pour le contrôle du processus et les algorithmes génétiques pour l'optimisation du système flou. Dans [HPK04], les auteurs présentent un modèle orienté diagnostic d'une pile à combustible de type PEM basé sur la logique floue et réglé moyennant un algorithme génétique. Aussi nombreux que sont les domaines d'application, sont différentes aussi les approches adoptées dans l'optimisation du contrôleur flou notamment dans le choix des paramètres à régler. Dans [HE94], l'approche utilisée maintient la forme des fonctions d'appartenance et cherche les règles de contrôle optimales alors que dans [CL00], l'ensemble des paramètres à caractériser comporte à la fois les règles d'inférence et les fonctions d'appartenance du système flou. Quant à l'application de l'algorithme génétique pour l'optimisation d'un système de contrôle flou dans le but de la gestion d'énergie, des études récentes sont notées. Ces études concernent des véhicules hybrides de configuration parallèle [Pou07], [WY06b] présentant une approche similaire à celle adoptée dans le cas de cette étude.

Comme précisé dans la section précédente, nous allons procéder à l'optimisation des paramètres du système flou déjà présenté moyennant l'algorithme génétique. Bien que dans certains travaux, l'algorithme génétique sert à trouver le jeu des règles floues adéquates, nous allons, en revanche, maintenir fixe l'ensemble des règles floues déjà élaborées ainsi que le nombre et le type des fonctions d'appartenances correspondantes. L'algorithme génétique sera utilisé, dans ce cas, pour trouver l'emplacement optimal des points caractéristiques de ces fonctions. Par cette approche, nous prenons soin ainsi de conserver la logique qui est derrière la conception même de ce système flou. Le but de toute optimisation étant la minimisation d'un certain critère, ce dernier reste toujours la consommation d'hydrogène de la pile à combustible. Cela dit, cette phase d'optimisation est ainsi effectuée hors ligne moyennant les profils de missions récupérés. Le système flou, une fois identifié sera, quant à lui, utilisé dans la gestion en temps réel de l'énergie. Dans ce qui suit, nous allons décrire la mise en oeuvre de l'algorithme génétique tout

en commençant par un court rappel du principe général de cet algorithme.

#### 4.4.1 Principe de la méthode

L'utilisation de l'algorithme génétique met en évidence les éléments suivants :

1. Un principe de codage de l'élément de population. Cette étape associe à chacun des points de l'espace d'état une structure de données. Elle se place généralement après une phase de modélisation mathématique du problème traité. La qualité du codage des données conditionne le succès des algorithmes génétiques.
2. Un mécanisme de génération de la population initiale. Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures. Le choix de la population initiale est important car il peut rendre plus ou moins rapide la convergence vers l'optimum global.
3. Une fonction à optimiser. Celle-ci retourne une valeur de  $R^+$  appelée fitness ou fonction d'évaluation de l'individu.
4. Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état. L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existant dans la population, l'opérateur de mutation a pour but de garantir l'exploration de l'espace d'état.
5. Des paramètres de dimensionnement : taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation.

Le principe général du fonctionnement d'un algorithme génétique est représenté sur la figure 4.25. Nous commençons par générer une population d'individus de façon aléatoire. Pour passer d'une génération  $k$  à une génération  $k + 1$ , les trois opérations suivantes sont répétées pour tous les éléments de la population  $k$ . Des couples de parents  $P_1$  et  $P_2$  sont sélectionnés en fonction de leur adaptations. L'opérateur de croisement leur est appliqué avec une probabilité  $P_c$  et génère des couples d'enfants  $E_1$  et  $E_2$ . D'autres éléments  $P$  sont sélectionnés en fonction de leur adaptation. L'opérateur de mutation leur est appliqué avec la probabilité  $P_m$  et génère des individus mutés  $E$ . Le niveau d'adaptation des enfants ( $E_1, E_2$ ) et des individus mutés  $E$  sont ensuite évalués avant insertion dans la nouvelle population. Différents critères d'arrêt de l'algorithme peuvent être choisis. L'algorithme peut être arrêté lorsque la population n'évolue

plus ou plus suffisamment rapidement ou bien si le nombre de générations que l'on souhaite exécuter, fixé à priori, est atteint.

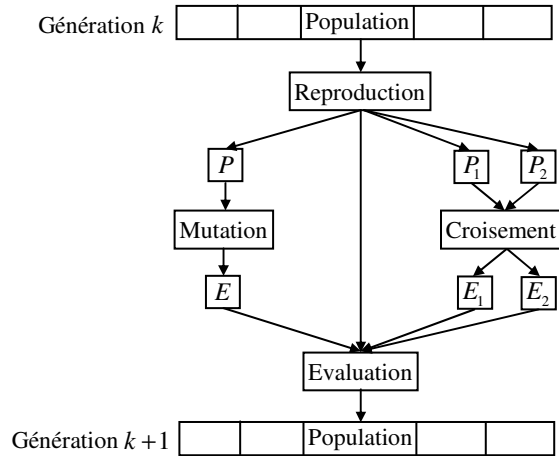


FIG. 4.25 – Principe général des algorithmes génétiques

#### 4.4.2 Mise en oeuvre de l’algorithme génétique

L’algorithme génétique que nous avons mis en oeuvre est implanté sous Matlab moyennant des boîtes d’outils spécifiques, notamment les boîtes d’outils « Genetic Algorithm Toolbox » et « Fuzzy Logic Toolbox ». L’organigramme faisant figurer les étapes principales de cet algorithme est donné par la figure 4.26. Suivant le principe de fonctionnement de l’algorithme, une population initiale comprenant un nombre  $N_{pop}$  d’individus est créée, chacun de ces individus formant une combinaison spécifique des paramètres de réglage à optimiser. A chaque pas de l’algorithme génétique, le système d’inférence flou est construit à partir des paramètres de l’individu correspondant. Le système flou ainsi élaboré est ensuite évalué sur tout le temps de cycle du profil de mission choisi. La fonction d’évaluation est ainsi calculée pour chaque individu par respect à un critère donné. L’étape suivante consiste à sélectionner des individus spécifiques auxquels sont appliquées des opérations de croisement et de mutation. Les nouveaux individus créés dans cette étape sont de nouveau évalués pour conserver les meilleurs individus ou les individus qui se sont adaptés le mieux au critère imposé. Ces individus forment la population de la génération suivante qui subit le même processus que sa génération précédente. L’algorithme s’arrête si les critères d’arrêts choisis sont satisfaits. Le critère que nous avons choisi est l’atteinte d’un nombre fixe de générations,  $N_{gen}$ .



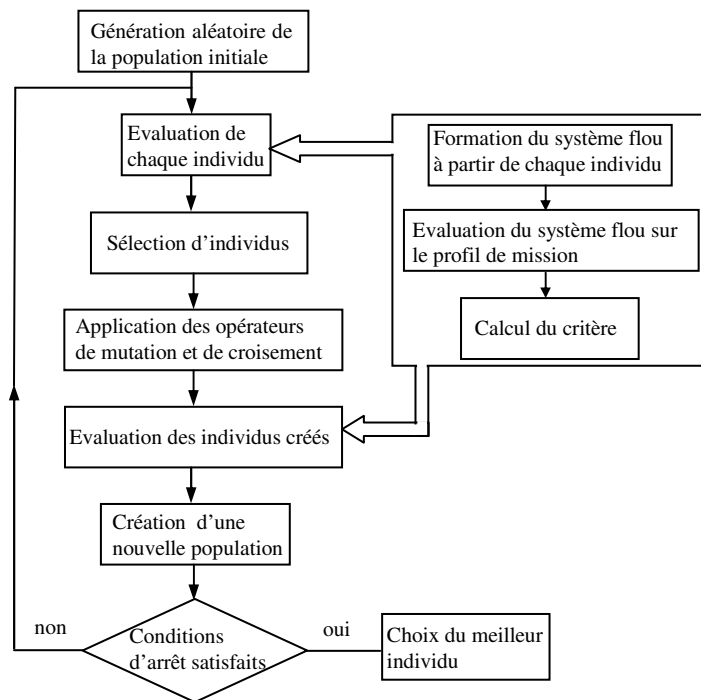


FIG. 4.26 – Organigramme de fonctionnement de l'algorithme génétique

Cela dit, l'algorithme génétique présente des fonctions standards qui sont notamment les fonctions de génération de la population initiale, « CreationFcn », les opérateurs de sélection des meilleurs individus, « SelectionFcn », de croisement entre individus, « CrossoverFcn » et de mutation des gènes d'un individu, « MutationFcn ». Le choix de chaque fonction doit être fait ainsi que des paramètres ou options propres à chacune de ces fonctions. Dans notre étude, nous avons choisi les opérateurs standards donnés par défaut par la boîte d'outil de l'algorithme génétique. Sans entrer dans les détails du fonctionnement de ces fonctions qui peuvent être consultés dans le manuel d'utilisation, nous nous contentons de présenter les fonctions choisies et leurs paramètres de réglage dans le tableau 4.4.

Il s'avère nécessaire enfin de préciser les principaux paramètres de réglage des fonctions de l'algorithme génétique donnés dans le tableau 4.5. En effet en précisant un nombre d'individus classés comme élites, « EliteCount », égal à 20, nous précisons par là que 20 des 100 individus de la population qui possèdent les degrés d'évaluation les plus élevés sont directement transmis à la génération suivante. D'autre part, la probabilité de croisement donnée par le paramètre « CrossoverFraction » égale à 0,8 indique que 80% des individus restants, après le choix des élites,

TAB. 4.4 – Opérateurs standards de l’algorithme génétique utilisés dans notre étude

Type d’opérateur	Fonction choisie	Description
CreationFcn	gacreationuniform	Fonction de génération de la population initiale
SelectionFcn	selectionstochunif	Fonction de sélection
CrossoverFcn	crossoverscattered	Fonction de croisement
MutationFcn	mutationadaptfeasible	Fonction de mutation

sont choisis pour leur faire subir les croisements nécessaires ce qui implique, dans notre cas, que 64 individus sont créés par croisement. Le reste de la population, 16 individus dans ce cas, vont donc subir une mutation dans leurs gènes afin de se transmettre dans la génération suivante.

TAB. 4.5 – Paramètres de réglage des fonctions de l’algorithme génétique

Paramètre	Valeur	Description
$N_{pop}$	100	Nombre d’individus par population
EliteCount	20	Nombre d’individus élites conservés
CrossoverFraction	0,8	Fraction de la population créée par croisement

Ayant résumé les opérateurs standards utilisés dans l’algorithme génétique, une attention particulière doit être portée concernant deux éléments critiques dans l’application de la méthode qui sont le codage de l’individu et la fonction d’évaluation que nous allons exposer dans les paragraphes suivants.

#### 4.4.2.1 Codage de l’individu

Chaque individu dans un algorithme génétique est représenté par un chromosome. Un chromosome est formé d’une séquence de gènes d’un certain alphabet. Ce dernier pourrait être composé de chiffres binaires, de nombres réels, d’entiers, de symboles, de matrices, etc. Si les codages binaires ont été très utilisés à l’origine, les codages réels sont désormais largement utilisés, notamment dans les domaines applicatifs pour l’optimisation de problèmes à variables réelles

[Mic92]. Dans le cas de notre étude, le chromosome contenant les paramètres des fonctions d'appartenance du système flou sera codé en réel. Nous allons par la suite poser certaines hypothèses dans le but d'assurer la performance de l'algorithme en réduisant le nombre de paramètres à optimiser. Les fonctions d'appartenance sont donc toujours de type trapézoïdal. En outre, une fonction d'appartenance s'annule lorsque la fonction suivante devient unitaire. De plus, comme déjà présenté dans la section 4.3.2.1, nous avons recours à cinq fonctions d'appartenances pour représenter les puissances  $P_{dem}$  et  $P_{PAC}$  alors que quatre fonctions sont suffisantes pour représenter l'état de charge  $E$ . Cela implique que huit paramètres seront nécessaires pour coder les fonctions d'appartenance de  $P_{dem}$  et  $P_{PAC}$  et six pour ceux de  $E$  comme montré dans la figure 4.27. La concaténation de ces paramètres constitue un individu ou encore un chromosome formé dans ce cas de 22 gènes suivant la figure 4.28. Une population formée de  $N_{pop}$  d'individus est ensuite créée. Cette population évolue d'une génération à l'autre en s'adaptant à un critère d'évolution. Chaque individu est ainsi évalué suivant une fonction d'évaluation ou une fonction d'adaptation qui sera le sujet d'étude du paragraphe suivant.

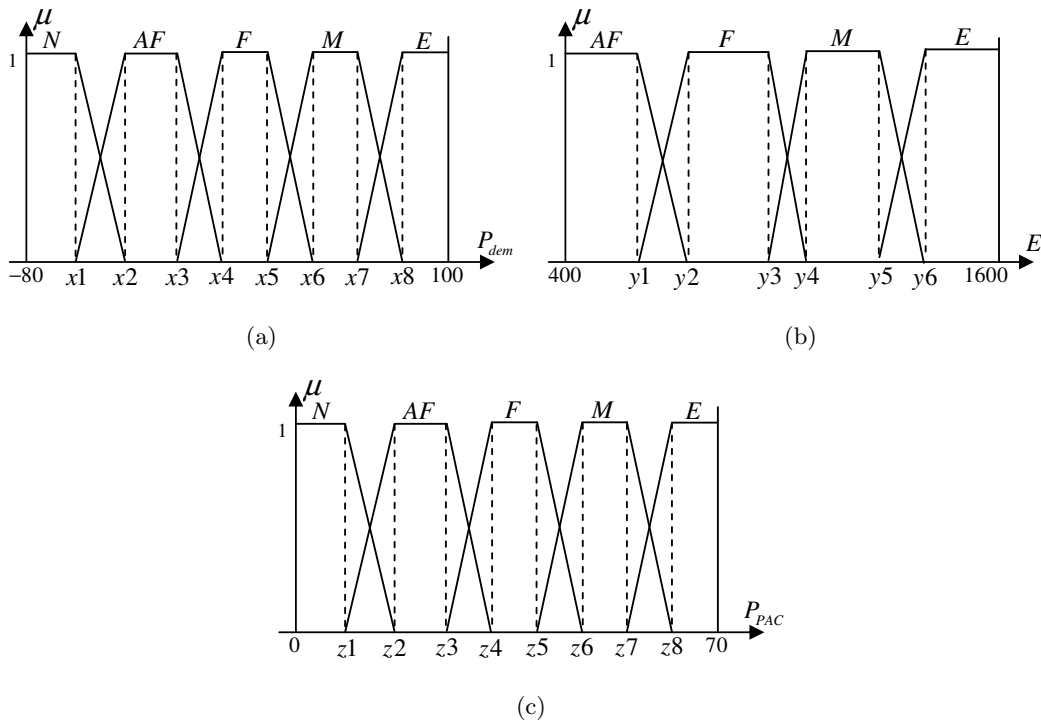


FIG. 4.27 – Paramètres caractéristiques des fonctions d'appartenance des variables : (a)  $P_{dem}$  ; (b)  $E$  ; (c)  $P_{PAC}$

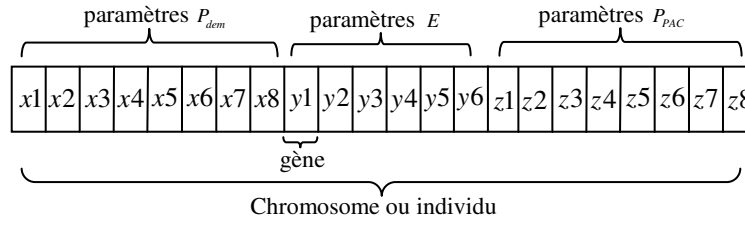


FIG. 4.28 – Paramètres à optimiser considérés comme gènes pour former un chromosome ou un individu

#### 4.4.2.2 Fonction d'évaluation

Le choix des individus est basé sur la fonction d'évaluation ou d'adaptation. Dans le cas de notre application, nous cherchons à minimiser la consommation d'hydrogène tout en assurant la puissance demandée sur le parcours suivi. Cela dit, la fonction d'évaluation,  $F_{eval}$ , correspond à un critère optimal  $C_{opt}$  d'après l'équation 4.3 étant donné que le fait de maximiser la fonction d'évaluation,  $F_{eval}$ , revient à minimiser le critère d'optimisation  $C_{opt}$ . Ce dernier tient compte de l'énergie d'hydrogène consommée (en kW.s) sur l'intervalle de temps correspondant au profil de mission effectué,  $E_{H_2}$ , dont l'expression reste la même pour tous les algorithmes d'optimisation adoptés dans notre étude (eq 4.5). Cependant le fait d'assurer obligatoirement la puissance demandée qui a été pris en considération par la gestion des contraintes dans l' algorithme de programmation dynamique, est, en revanche, intégré dans le critère même d'optimisation de l'algorithme génétique. Dans ce cas, l'algorithme tend à minimiser d'une part la consommation d'hydrogène  $E_{H_2}$  et d'autre part une valeur quantifiant l'erreur quadratique moyenne  $e_{quadr}$  entre la puissance demandée et la puissance réellement fournie. Le critère ainsi formé est donné d'après l'équation 4.4 où  $k$  est un facteur de mise à l'échelle entre la consommation et l'erreur. Le choix de ce facteur sert aussi à régler la précision vu que, plus  $k$  est faible, plus on favorise la minimisation de la consommation face à l'erreur et vice versa.

$$F_{eval} = \frac{1}{C_{opt}} \quad (4.3)$$

$$C_{opt} = \frac{E_{H_2}}{k} + e_{quadr} \quad (4.4)$$

$$E_{H_2} = \sum_i \frac{P_{PAC}(i) \cdot \Delta t}{\eta_{PAC}(P_{PAC}(i))} \quad (4.5)$$

L'expression de l'erreur quadratique moyenne  $e_{quadr}$  est donnée dans l'équation suivante :

$$e_{quadr} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (e_{P_{dem}}(i))^2}{N}} \quad (4.6)$$

Où  $e_{P_{dem}}$  est l'erreur instantanée de puissance entre la puissance demandée,  $P_{dem}$ , et la puissance réellement fournie,  $P_{four}$  :

$$e_{P_{dem}}(i) = P_{dem}(i) - P_{four}(i) \quad (4.7)$$

La puissance réellement fournie n'est autre que la somme de la puissance fournie par la pile à combustible,  $P_{PAC\_cor}$ , et la puissance fournie ou absorbée par l'élément de stockage,  $P_{ES\_cor}$  après correction de leur valeur en tenant compte des saturations sur ces puissances et sur l'état d'énergie :

$$P_{four}(i) = P_{PAC\_cor}(i) + P_{ES\_cor}(i) \quad (4.8)$$

Le calcul de ces puissances corrigées à chaque instant  $i$  du temps de cycle est donné dans l'annexe B.

En outre, la fonction d'évaluation va nous permettre de plus de gérer les bornes et contraintes imposées sur les paramètres de l'individu par l'utilisation d'une fonction de pénalité qui pénalise les solutions non faisables réduisant ainsi leur fonction d'évaluation [CC02]. En effet, l'algorithme génétique nous permet de fixer des bornes inférieures et supérieures à chacun des gènes de l'individu. Cela permet d'accélérer la convergence de l'algorithme en ne choisissant que les valeurs faisables contenues entre ces bornes. Dans notre cas, ces contraintes sont données par l'équation 4.9. Cependant, une contrainte supplémentaire donnée par l'équation 4.10 s'impose. Afin de gérer cette contrainte, les individus dont les gènes ne vérifient pas la condition de l'équation 4.10 sont pénalisés par un critère  $C_{opt}$  assez élevé. Cela permet à l'algorithme génétique de s'écarter au fur et à mesure de ces valeurs non faisables.

$$\begin{cases} -80 < x_i < 100 & i = 1, \dots, 8 \\ 400 < y_i < 1600 & i = 1, \dots, 6 \\ 0 < z_i < 70 & i = 1, \dots, 8 \end{cases} \quad (4.9)$$

$$\begin{cases} x_i < x_{i+1} & i = 1, \dots, 7 \\ y_i < y_{i+1} & i = 1, \dots, 5 \\ z_i < z_{i+1} & i = 1, \dots, 7 \end{cases} \quad (4.10)$$

Pour résumer, le principe général de la méthode d'optimisation du système de décision flou à l'aide d'un algorithme génétique est montré dans la figure 4.29. En effet, l'algorithme génétique est utilisé afin d'optimiser le système de décision flou. Cette optimisation est effectuée dans le but de la minimisation du combustible utilisé sur un profil de mission donné. Il est clair que cette phase, nécessitant la connaissance préalable de la puissance demandée est effectuée hors ligne. Une fois les paramètres optimaux identifiés, le contrôleur flou ainsi optimisé est utilisé dans la gestion de l'énergie en ligne sans connaissance préalable du trajet effectué. Une question primordiale se pose à ce sujet : le contrôleur ainsi élaboré aura-t-il la robustesse nécessaire pour s'adapter efficacement à tout genre de profil de puissance demandée ? Cette question est justifiée du fait que l'optimisation moyennant l'algorithme génétique tend à s'adapter au profil spécifique auquel elle est appliquée. Nous pouvons pousser de plus la réflexion pour nous interroger sur l'effet du profil de mission sur le contrôleur obtenu dans une tentative de trouver un ensemble de critères qui permettent de facilement modifier le contrôleur pour son application sur un type donné de mission. Dans cet objectif, nous allons par la suite appliquer la méthode d'optimisation moyennant les deux profils de mission utilisés tout le long de notre étude, le profil INRETS et ESKISEHIR. Nous commençons par une étude comparative temporelle et fréquentielle afin de tirer certains traits de différence majeurs sachant que le profil INRETS représente le trajet d'un véhicule hybride en milieu urbain alors que le profil ESKISEHIR représente le trajet d'un tramway sur la ligne d'ESKISEHIR en Turquie.

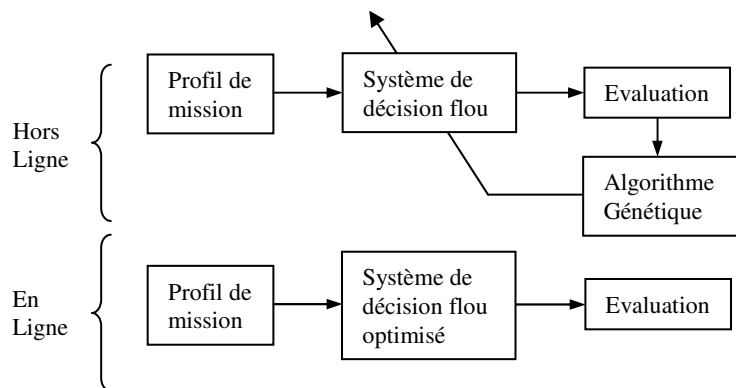


FIG. 4.29 – Principe de la méthode d'optimisation du système flou

### 4.4.3 Etude comparative des profils de mission en vue d'interpréter les résultats de l'algorithme génétique

#### 4.4.3.1 Analyse temporelle

Une analyse temporelle des deux profils de mission mettant en relief les puissances maximales et moyennes mises en jeu est montrée dans la figure 4.6. Dans cette figure, la variable « PDemPosMean » est notée pour désigner la puissance positive moyenne demandée sur l'intégralité du profil de mission alors que « PDemPosMax » désigne la puissance demandée positive maximale. « PDemNegMean » représente la puissance demandée négative moyenne et « PDemNegMax » la puissance négative maximale. Enfin la puissance moyenne globale tenant compte des demandes positives et négatives est représentée par la variable « PDemMean ». Ces données sont aussi regroupées dans le tableau 4.6. La figure 4.31 montre de plus, l'histogramme représentant la distribution des puissances demandées en pourcentage d'occurrence pour des pas de 10 kW. A titre d'exemple, 45% des puissances instantanées du profil de mission INRETS sont réparties entre -5 et 25 kW alors que 32% des puissances du profil ESKISEHIR sont incluses entre -5 et 5 kW pour 24 % entre 5 et 15 kW. A partir du tableau 4.6, nous pouvons tirer les rapports entre les puissances maximales positives et négatives et les puissances moyennes qui sont regroupés dans le tableau 4.7. A partir de ces observations, la différence majeure que nous avons pu tirer est l'écart observé au niveau du rapport entre la puissance demandée positive et moyenne. Cet écart montre que, bien que le profil INRETS présente des pics plus élevés de puissance, sa puissance moyenne mise en jeu est plus faible comparée à celle du profil ESKISEHIR, une différence que nous allons exploiter dans l'interprétation des résultats.

TAB. 4.6 – Statistiques relatives aux deux profils de mission utilisés, INRETS et ESKISEHIR

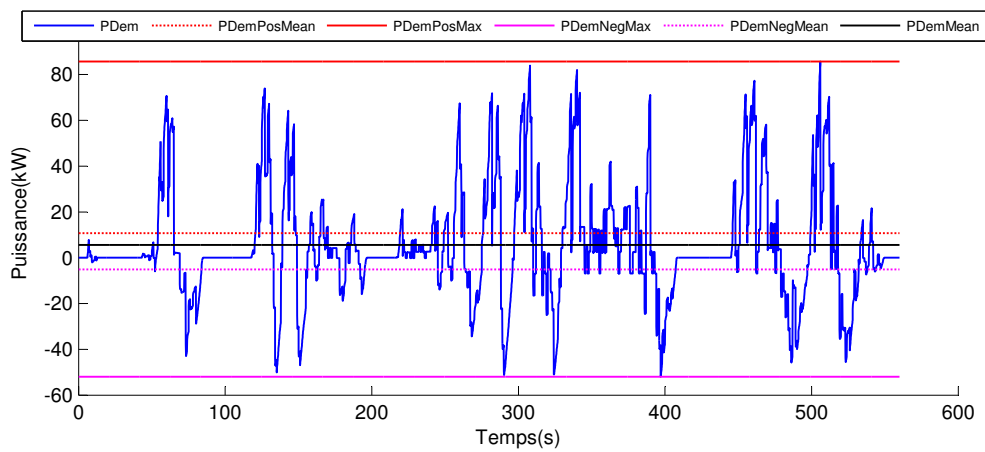
Profil	PDemPosMax	PDemNegMax	PDemPosMean	PDemNegMean	PDemMean
INRETS	85,6 kW	-52 kW	10,7 kW	-5,1 kW	5,6 kW
ESKISEHIR	63,8 kW	-57 kW	13,7 kW	-5,5 kW	8,2 kW

#### 4.4.3.2 Analyse fréquentielle

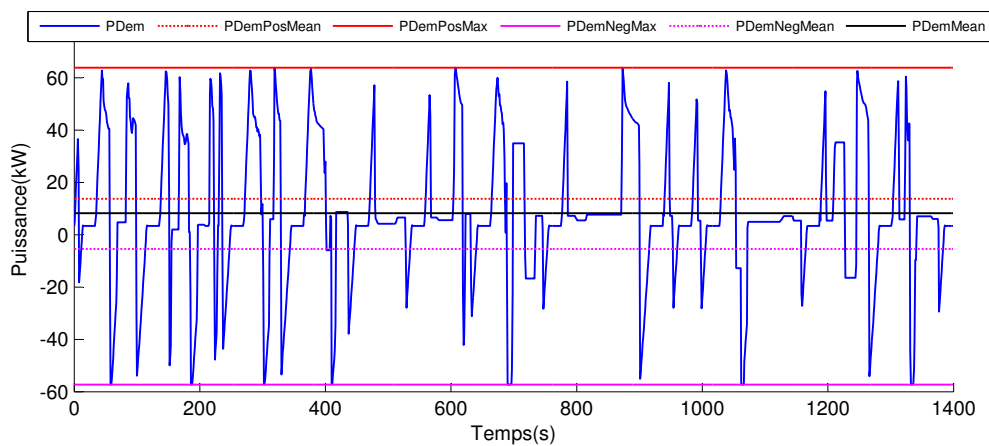
Dans une tentative de trancher sur la rapidité de variation de la puissance demandée, nous avons eu recours à une analyse spectrale des deux profils de mission utilisés moyennant la trans-

TAB. 4.7 – Rapports entre puissances maximales et puissances moyennes pour les profils INRETS et ESKISEHIR

Profil	PDemPosMax/PDemPosMean	PDemNegMax/PDemNegMean
INRETS	8	10,2
ESKISEHIR	4,6	10,4



(a)



(b)

FIG. 4.30 – Analyse temporelle des profils de mission (a) INRETS ; (b) ESKISEHIR



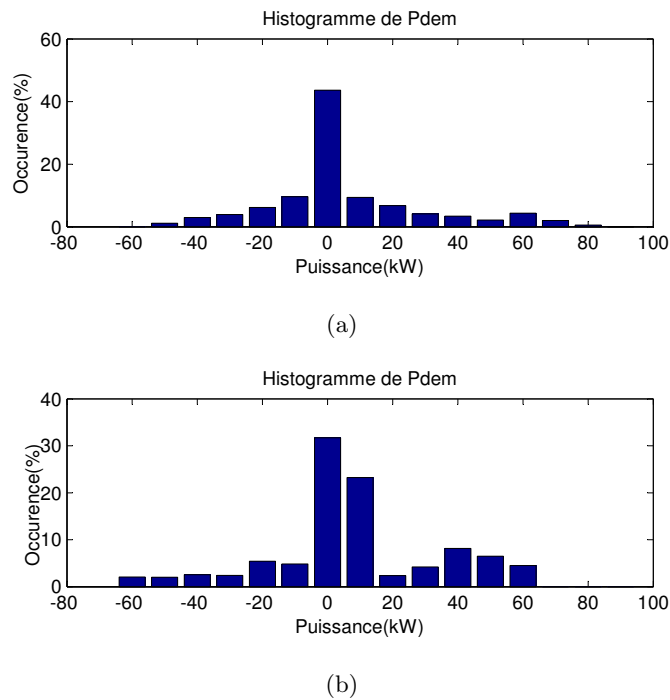


FIG. 4.31 – Histogramme représentant la distribution des puissances en pourcentage d'occurrence dans le cas du profil (a) INRETS ; (b) ESKISEHIR

formé de Fourier rapide. La figure 4.32 compare le spectre occupé par les deux profils jusqu'à la fréquence de 0,2 Hz au delà de laquelle l'amplitude devient négligeable. En observant ces deux courbes, nous pouvons dire que ces deux profils ont à peu près la même occupation spectrale ce qui ne permet pas de tirer des informations significatives concernant leur degré de variation avec l'analyse fréquentielle. Par contre, l'auto-corrélation, appliquée sur chacun des profils peut nous donner dans ce cas une idée sur leur degré de variation. En effet, l'auto-corrélation sert à mesurer le caractère répétitif d'un signal donné. Sa rapidité de décroissance à partir de la valeur maximale à l'origine permet d'apprécier le caractère de brièveté d'un signal ou son degré de variation. La figure 4.33 montre l'auto-corrélation des deux profils avec un zoom autour du pic maximal. A partir de cette figure, nous pouvons observer que l'auto-corrélation du profil INRETS passe de la valeur maximale à la valeur minimale dans une durée de 12,5 s alors que 20 s seront nécessaires pour le profil ESKISEHIR ce qui permet de conclure que le profil ESKISEHIR est légèrement plus lent.

L'étude ainsi faite, aussi brève qu'elle soit, constitue un avant goût d'une étude plus complète pouvant être conduite en mettant en oeuvre d'autres techniques et surtout en utilisant des

profils de missions plus nombreux et diversifiés afin de les classifier. Une analyse temps-échelle moyennant la transformée en ondelettes est une perspective à ne pas négliger. Nous allons par la suite explorer les résultats de l'application de l'algorithme génétique sur les deux profils.

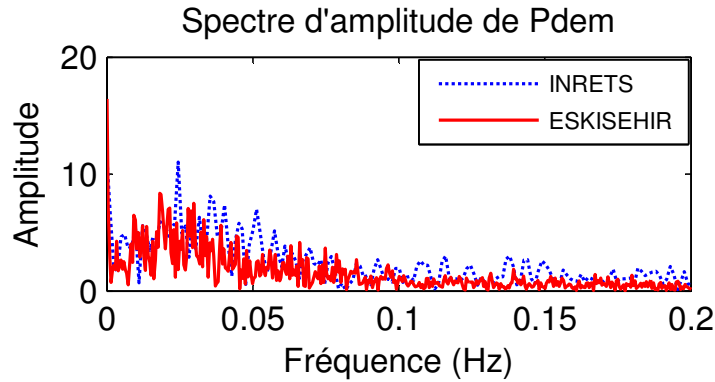


FIG. 4.32 – Spectre d'amplitude de la puissance demandée pour les deux profils de mission INRETS et ESKISEHIR

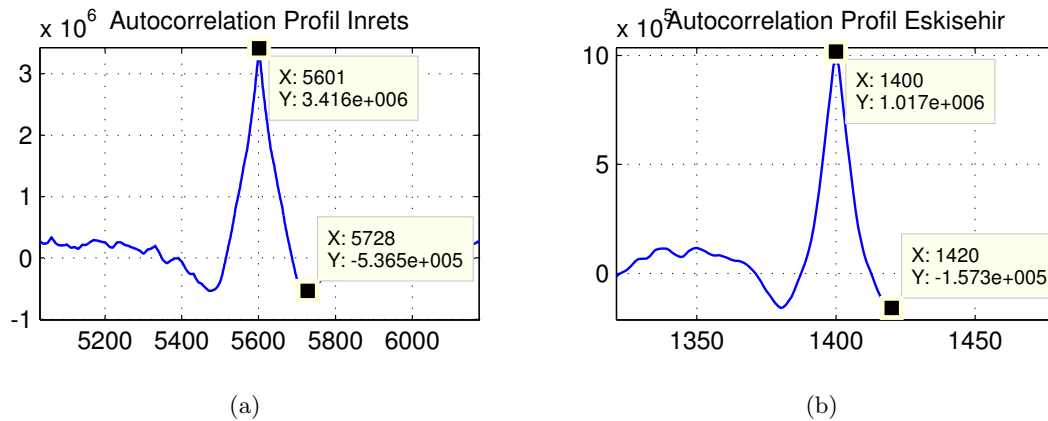


FIG. 4.33 – Autocorrelation de la puissance demandée dans le cas du profil (a) INRETS; (b) ESKISEHIR

#### 4.4.4 Résultat de l'algorithme génétique appliqué sur les deux profils de mission

Nous allons exposer, au cours de ce paragraphe, les résultats obtenus par l'application de l'algorithme génétique sur les deux profils de missions utilisés. Les fonctions d'appartenance des deux variables d'entrée du système d'inférence flou,  $E$  et  $P_{dem}$ , et de la variable de sortie,  $P_{PAC}$ , sont données dans la figure 4.34. Les surfaces caractéristiques issues de l'application des règles

d'inférences sur l'ensemble de ces fonctions d'appartenance, comme déjà expliqué dans le paragraphe 4.3.2.3, sont ainsi données dans la figure 4.35. La distribution optimale des puissances obtenue par l'application du système flou optimisé pour chaque profil de mission est donnée dans la figure 4.36. Cette figure montre que la demande de puissance est tout à fait satisfaite ainsi que la totalité de l'énergie de freinage est récupérée. Nous remarquons aussi que la puissance de la pile à combustible est nulle lorsque le véhicule est en mode de freinage. Il est vrai que cette condition était prise comme hypothèse dans la première règle d'inférence (**SI**  $P_{dem}$  est « négative » **ALORS**  $P_{PAC}$  est « nulle ») mais cela ne justifie pas qu'elle soit tout à fait appliquée puisque nul n'oblige l'algorithme génétique à considérer que la condition « négative » désigne uniquement les puissances comprises entre -80 kW et 0. Cet algorithme possède, en effet, toute la liberté de déplacer les paramètres de cette fonction d'appartenance pour permettre à la pile à combustible de charger les supercapacités même en état de freinage au cas où cela s'avère une nécessité.

Le tableau 4.8 regroupe les valeurs de la consommation obtenue évaluée en tant qu'amélioration apportée en consommation par comparaison à la consommation nécessaire sans la présence de l'élément de stockage (PAC seule). Les valeurs de l'erreur quadratique moyenne, comme exprimée dans l'équation 4.6, sont également données dans ce tableau montrant une erreur négligeable sur l'ensemble des combinaisons étudiées. Ces combinaisons, à savoir : « Inr-Inr », « Esk-Inr », « Esk-Esk », et « Inr-Esk », également expliquées dans ce tableau, désignent les applications mutuelles du système, optimisé sur un profil et testé sur le second. Les résultats obtenus montrent que le système flou optimisé moyennant l'algorithme génétique est doté d'une robustesse considérable puisqu'il présente des performances exemplaires au niveau de la consommation et de l'erreur sur les deux profils utilisés, peu importe sur lequel il a été optimisé. Ce résultat est certainement favorisé par le fait que ces deux profils ne présentent pas de différences assez flagrantes comme déjà mentionné dans la partie de comparaison, mais aussi et surtout, par le fait que l'élément de stockage est dans notre cas surdimensionné ce qui permet cette aisance. Cette réalité peut être observée de plus sur la figure 4.37 qui montre l'évolution de l'état de charge des supercondensateurs le long des profils de mission toujours pour les quatre combinaisons étudiées. Ces figures montrent que l'état de charge de l'élément de stockage dans le cas du profil INRETS oscille entre 400 et 900 kW.s et entre 400 et 1100 kW.s dans le cas du profil ESKISEHIR mais dans les deux cas, nous restons loin des contraintes imposées ([400 , 1600 ]).

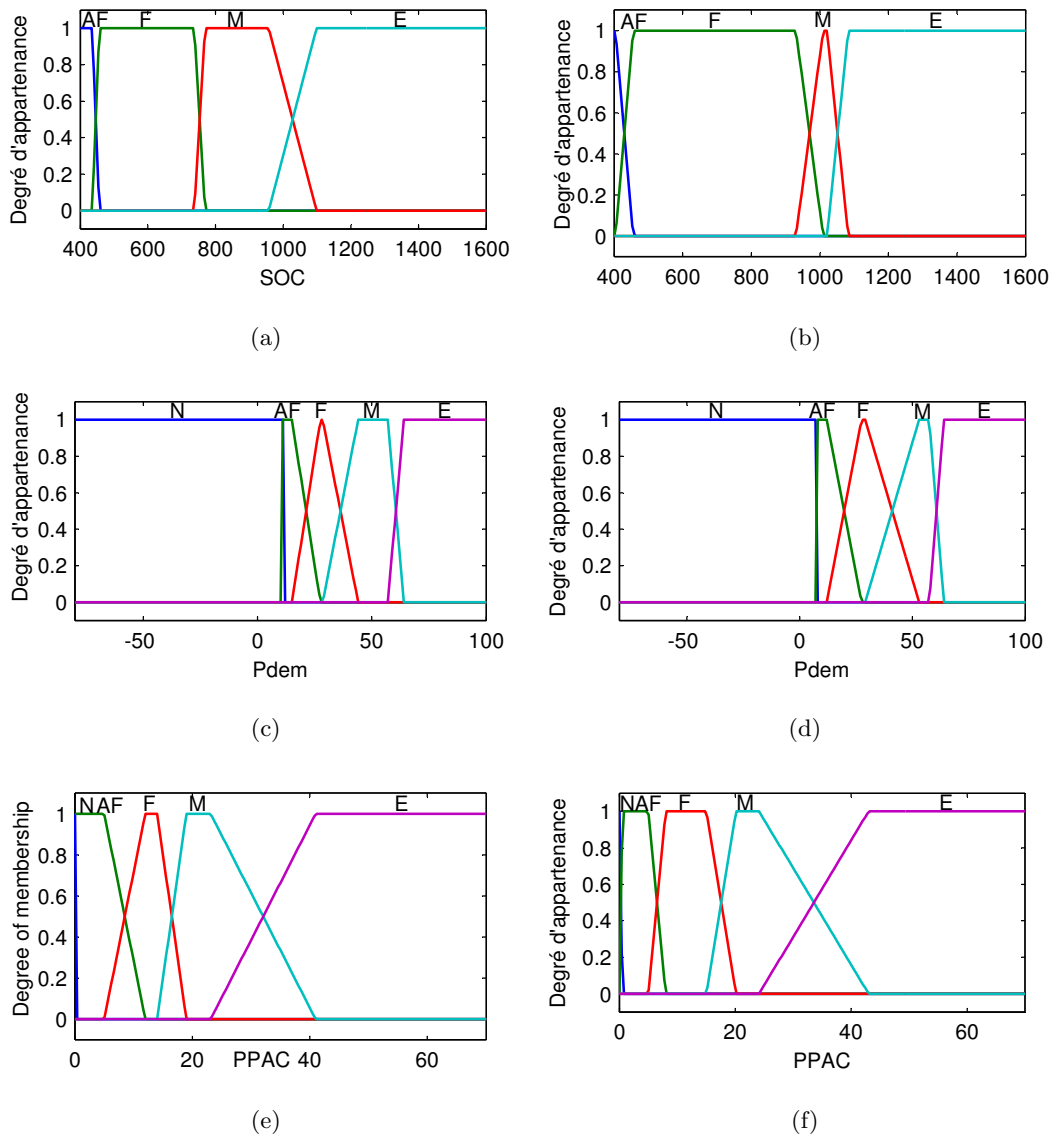


FIG. 4.34 – Fonctions d'appartenance du système flou optimisées sur chacun des profils (a), (c) et (e) : INRETS; (b), (d) et (f) : ESKISEHIR

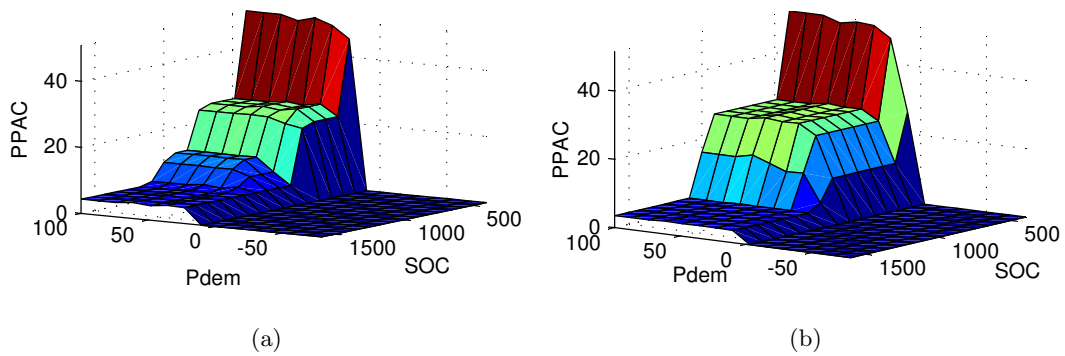
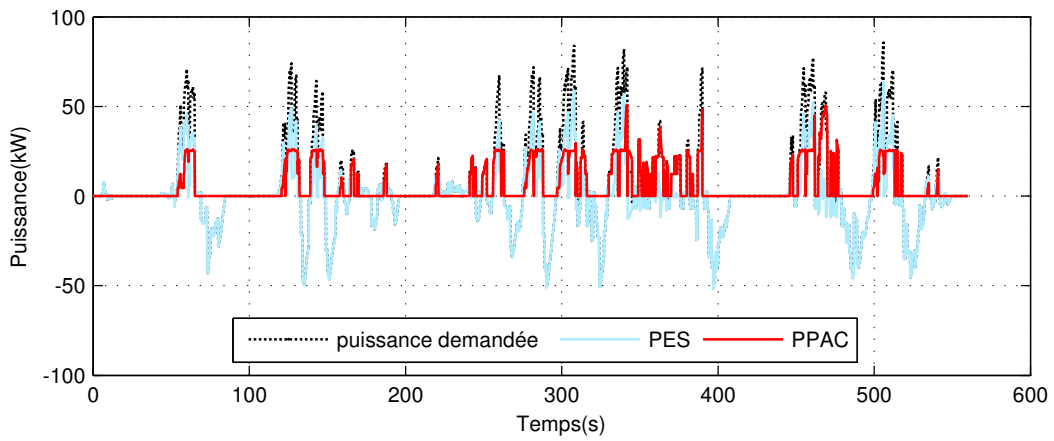
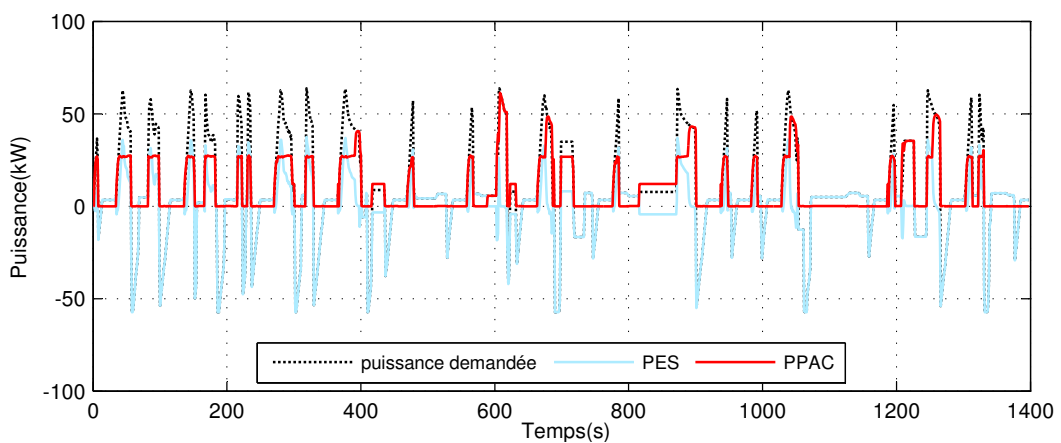


FIG. 4.35 – Surface caractéristique du système flou obtenue par optimisation effectuée sur les profils : (a) INRETS; (b) ESKISEHIR



(a)



(b)

FIG. 4.36 – Distribution optimale des puissances obtenue avec l'algorithme génétique pour les profils de mission (a) INRETS; (b) ESKISEHIR

TAB. 4.8 – Consommation obtenue et erreur quadratique moyenne relevée avec l’optimisation par algorithme génétique du système flou

	Inr-Inr	Esk-Inr	Esk-Esk	Inr-Esk
Amélioration	43,8 %	41,5 %	37,9 %	35,6 %
ErreurQuadrMoy	$1,5 \cdot 10^{-13}$	$1,6 \cdot 10^{-13}$	$2,4 \cdot 10^{-14}$	$2,3 \cdot 10^{-14}$
<p><b>Inr-Inr</b> : Système optimisé sur le profil INRETS et appliqué sur le profil INRETS  <b>Esk-Inr</b> :Système optimisé sur le profil ESKISEHIR et appliqué sur le profil INRETS  <b>Esk-Esk</b> : Système optimisé sur le profil ESKISEHIR et appliqué sur le profil ESKISEHIR  <b>Inr-Esk</b> : Système optimisé sur le profil INRETS et appliqué sur le profil ESKISEHIR</p>				

En vue d’interpréter l’effet du profil de mission utilisé sur le résultat de l’optimisation, nous avons groupé les deux surfaces caractéristiques du système flou obtenu pour chaque profil sur un même graphe dans la figure 4.38. Comme première interprétation, nous pouvons dire que le profil ESKISEHIR présente une puissance moyenne plus élevée que celle du profil INRETS comme montré dans les tableaux 4.6 et 4.7 ce qui fait que le système de décision flou adapté au profil ESKISEHIR demande plus de puissance à la pile à combustible comme montré dans la figure 4.38. Cette différence peut être observée sur cette figure notamment en deux endroits précis. En effet,  $P_{PAC}$  reste fixe jusqu’à l’état de charge  $E$  égal à 900 kW.s dans le cas du profil ESKISEHIR alors que pour le profil INRETS elle commence à chuter à partir de la valeur de 700kW.s. De plus, dans le cas du profil INRETS, la pile à combustible arrête de fournir de la puissance au dessous d’une valeur de  $P_{dem}$  de 10 kW ce qui n’est pas le cas pour le profil ESKISEHIR.

Cette différence entre les surfaces caractéristiques résulte évidemment de la différence entre les fonctions d’appartenance comme nous pouvons l’observer dans la figure 4.34. Cette différence est notamment observée au niveau de la fonction d’appartenance « faible » de la variable d’entrée  $E$  et au niveau de la fonction « assez faible » de la variable de sortie  $P_{PAC}$  qui a pour effet de déplacer le centre de gravité de cette variable vers la droite ( $P_{PAC}$  plus élevé) dans le cas de faibles puissances demandées. Cela dit, malgré le fait que nous avons pu décrire qualitativement ces différences obtenues, les deux profils utilisés ne présentent pas des différences primordiales nous permettant de caractériser des lois quantitatives ou des paramètres fixes pouvant relier le

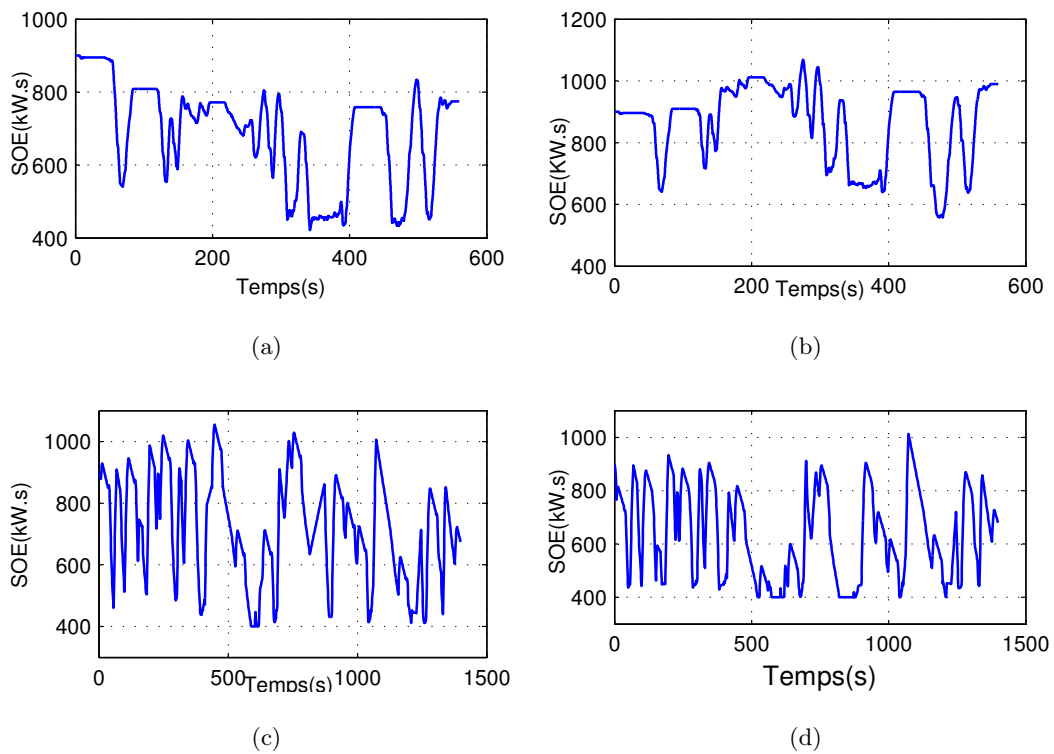


FIG. 4.37 – Évaluation de l'état de charge sur le système (a) Inr-Inr ; (b) Esk-Inr ; (c) Esk-Esk ; (d) Inr-Esk

système flou trouvé et le type de parcours utilisé. Une telle possibilité, si elle existe, nécessite une étude détaillée avec l'utilisation de plusieurs profils réels ou imaginaires présentant de grandes variations en puissance demandée maximale et optimale et en vitesse de variation etc. C'est donc une perspective intéressante dont nous avons contribué à jeter les bases.

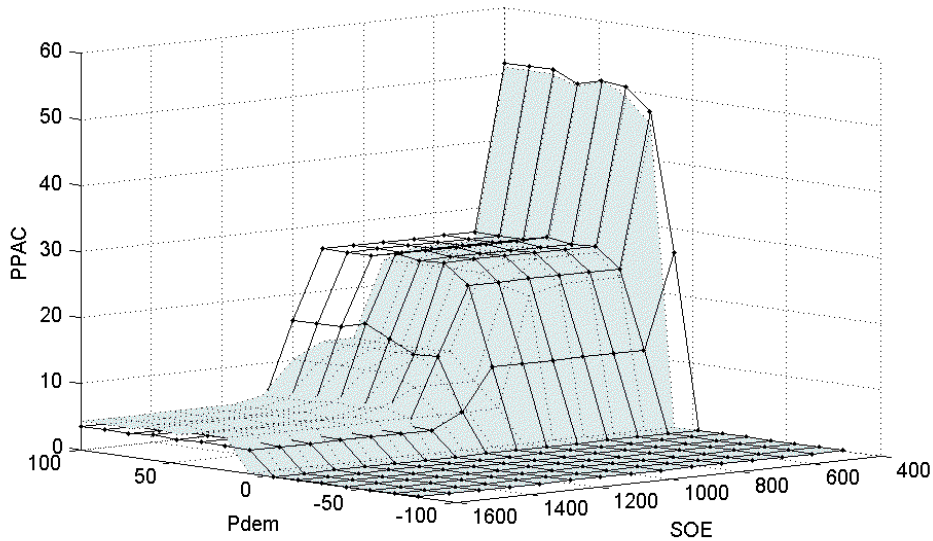


FIG. 4.38 – Comparaison des surfaces caractéristiques du système flou obtenues par optimisation sur les deux profils de mission

Enfin, le tableau de comparaison 4.9 regroupe les résultats des différentes méthodes d'optimisation mises en oeuvre dans cette étude. Il est clair que l'optimisation du système de décision flou à l'aide de l'algorithme génétique améliore considérablement les performances du système initial. En outre, nous pouvons remarquer que ce système flou optimisé, « GAFL » (Genetic Algorithm Fuzzy Logic), présente une amélioration de 4 à 5 % par comparaison à l'algorithme de programmation dynamique, « P.D. », alors que ce dernier doit théoriquement donner l'optimal global. Or cette faible différence observée est tout à fait justifiable. Elle est due, entre autres, aux approximations faites dans le traitement numérique des grandeurs analytiques tel le calcul intégral de l'énergie à partir de la puissance. Aussi faut il prendre en considération la discrétisation de l'espace de l'état de charge dans l'algorithme de programmation dynamique qui limite les pas possibles face à l'algorithme génétique. Enfin, une différence primordiale réside dans le fait que l'application de l'algorithme de programmation dynamique part du principe de fixer l'état de charge de l'élément de stockage à la fin du temps de cycle de mission, consi-



déré égal à l'état initial de 900kW.s dans notre cas. Or cette condition ajoute une contrainte pénalisant la méthode, une contrainte non prise en compte dans l'application de l'algorithme génétique comme nous pouvons le constater sur la figure 4.37. En revanche, la performance de l'algorithme génétique dépend de la population initiale utilisée. En effet, la méthode assure, par principe, la convergence vers un optimum global mais cela avec un nombre infini d'itérations ou de générations. Par contre, avec un nombre d'itérations raisonnable, l'algorithme peut converger vers un optimal local. Nous avons du faire face à ce problème en apportant des modifications à la population au cours du fonctionnement de l'algorithme.

TAB. 4.9 – Comparaison des résultats obtenus avec les différentes méthodes d'optimisation adoptées

Profil	Algorithme	Consommation	Amélioration
INRETS	P.D.	9 189,7 kW.s	38 %
	Flou	10 866 kW.s	27 %
	GAFL	8 359,9 kW.s	43,8 %
ESKISEHIR	P.D.	31 826 kW.s	33,7 %
	Flou	33 358 kW.s	30,5%
	GAFL	29 802 kW.s	37,9 %

## 4.5 Conclusion

Le but de ce chapitre était de proposer des méthodes quasi optimales pour la gestion en ligne de l'énergie électrique. A ce propos, nous avons conçu un système de décision à base de règles floues capable d'assurer la puissance demandée en respectant les contraintes imposées par le système. Ce système flou a montré la robustesse nécessaire en conservant sa performance une fois essayé sur différents profils de mission. L'optimisation du placement des fonctions d'appartenance des variables d'entrées et de sortie par l'application de l'algorithme génétique a accéléré la phase de calibrage de ce système tout en minimisant la consommation d'hydrogène le long des profils de mission testés. Nous avons de plus, évoqué l'effet du profil de mission sur les paramètres de la méthode utilisée. Une étude plus généralisée doit être faite en comparant plusieurs profils de mission dans le but de trouver un jeu de paramètres pouvant être facilement

réglé suivant la nature du profil de mission auquel le véhicule sera soumis.

# Conclusion et Perspectives

L'objectif visé dans ce travail de recherche est la gestion de l'énergie électrique dans un groupe électrogène hybride alimentant le moteur de traction d'un véhicule à pile à combustible. La puissance électrique demandée est convenablement distribuée à travers les éléments de ce groupe en minimisant autant que possible la consommation d'hydrogène. Cela dit, nous n'avons pas pris en compte, dans cette étude, la consommation d'électricité à bord du véhicule outre la demande de puissance nécessaire à la traction. Nous considérons, par là, que cette consommation est indépendante du profil de mission suivi et par suite n'intervient pas directement dans les stratégies de gestion adoptées. L'intégration de cette consommation peut être faite en ajoutant une puissance constante le long du trajet. D'autre part, la phase de démarrage à froid n'est pas considérée dans ce travail ; la pile à combustible est ainsi préchauffée et prête à fournir la demande de puissance.

Un élément clé de l'étude était de constituer un projet en simulation complet allant de la caractérisation des éléments jusqu'à la gestion d'énergie passant par la modélisation.

A ce propos une architecture standard du groupe électrogène hybride est étudiée. Cette architecture est formée de la pile à combustible associée à un hacheur survolteur d'une part et d'autre part d'un pack de supercondensateurs et un hacheur réversible en courant. Les différents éléments de ce groupe ont été dimensionnés dans le but de constituer une étude homogène basée sur un cas réel de prototypes de véhicules hybrides légers. Un dimensionnement convenable est nécessaire pour fixer des contraintes réalistes devant être gérées par les algorithmes de commande. Nous sommes conscients par là, que cette architecture constitue un modèle de base représentant les types d'éléments mis en jeu dans une telle application. Il est évident que d'autres éléments peuvent figurer dans une chaîne de traction. Les algorithmes d'optimisation

sont conçus dans un aspect modulaire afin de permettre une intégration facile de modèles ou de cartographies de pertes pour des éléments supplémentaires. Dans une même perspective, différents cas de dimensionnement imposant différentes contraintes peuvent aussi être testés.

Nous avons caractérisé les chemins de flux énergétique reliant le noeud électrique au stockage de l'énergie chimique dans le réservoir d'hydrogène d'une part et au stockage de l'énergie électrique dans les supercapacités d'autre part. Dans cette perspective, les rendements de chacun des éléments en fonction d'une certaine demande de puissance sont caractérisés. Un modèle de calcul des pertes dans les convertisseurs, tenant compte des pertes par commutation et par conduction dans les semi-conducteurs utilisés, est implanté. Les supercapacités modélisées par l'intermédiaire d'une résistance et d'une capacité équivalentes en série présentent des pertes de type ohmique liées à cette résistance équivalente. Les résultats de simulation ont montré un rendement assez élevé concernant l'élément de stockage et les convertisseurs statiques. Le rendement de la pile à combustible, quant à lui, est proportionnel à la tension aux bornes de cette pile et inversement proportionnel au courant débité par cette dernière et par suite à la puissance demandée. Pour de faibles puissances, la pile à combustible offre de meilleurs rendements.

Un modèle simple de la pile a été mis au point dans le but de caractériser la tension de la pile en fonction de la puissance demandée. Ce modèle calcule la tension en fonction du courant débité ainsi que de la température de la pile mais aussi des pressions partielles de l'oxygène et l'hydrogène présents respectivement dans la cathode et l'anode de la pile. En considérant que ces grandeurs sont fixées par l'utilisation de lois de commande appropriées, nous avons en revanche montré l'effet de variation de la pression cathodique sur le rendement global du système PAC. Nous avons ouvert, par là, une petite parenthèse sur l'importance de considérer la pile à combustible en tant que système complet comprenant la pile et ses auxiliaires. Le modèle des auxiliaires était restreint au compresseur d'air vu que c'est l'élément le plus gourmand en puissance d'une part et d'autre part, la puissance consommée par ce compresseur est proportionnelle à la demande de puissance de la pile au cas où une stoechiométrie constante doit être assurée du côté cathodique. Il faut signaler, enfin, que le modèle de la pile était expérimentalement validé en régime statique et dynamique pour une pile d'une plus faible puissance moyennant des essais de caractérisation et de suivie de cycle faites sur un banc d'essai de pile à Belfort.

---

Nous avons appliqué deux méthodes d'optimisation dynamique globale, à savoir la programmation dynamique et la commande optimale dans le but de déterminer la distribution instantanée des puissances qui minimise la consommation d'hydrogène sur un temps de cycle donné. Ces méthodes nécessitant la connaissance a priori du parcours suivi, se classent parmi les méthodes de gestion hors ligne. Si la première s'adapte parfaitement aux contraintes imposées par le dimensionnement des éléments du groupe électrogène, la commande optimale présente quant à elle de sévères limitations dans la gestion des contraintes. Une étude plus approfondie doit être faite pour assurer le bon fonctionnement de cet algorithme. D'autre part, l'application de ces méthodes d'optimisation nécessite des manipulations numériques comme la discrétisation de l'espace de temps et d'énergie concernant la programmation dynamique et l'approximation polynomiale des expressions de rendement dans le cas de la commande optimale. Ces manipulations, entre autres, font en sorte que le résultat donné n'est pas l'optimum global introduit par la théorie. Le temps de calcul élevé de la méthode de programmation dynamique empêche dès lors son utilisation en temps réel mais offre une base de comparaison pour évaluer les stratégies de gestion en ligne. Son application peut être tout de même envisagée dans une application de Tramway où le trajet parcouru est plutôt connu à l'avance.

Dans le cas d'un véhicule hybride léger sur un trajet inconnu parcouru à une vitesse variable, une stratégie de gestion en ligne ou en temps réel doit être appliquée. Dans ce but, nous avons eu recours à un système de décision à base de règles floues. Ce système, de part le principe même de la logique floue, présente une performance tout à fait acceptable en offrant la robustesse nécessaire face aux imprévus du trajet et la souplesse appréciée dans le profil de puissance généré par cet algorithme limitant ainsi les sauts brusques de puissances. Cependant le système flou présente des limitations au niveau de la minimisation de la consommation d'hydrogène d'une part et la difficulté de calibrage d'autre part, notamment dans le choix des paramètres des fonctions d'appartenance des variables d'entrées et de sortie de ce système flou. Pour remédier à ces limitations, nous avons utilisé un algorithme génétique capable de générer un jeu de paramètres convenable en minimisant la consommation d'hydrogène sur un profil donné.

Tout au long de cette étude, nous avons eu recours à deux profils de mission, l'un issu du parcours d'un véhicule électrique en milieu urbain (INRETS), l'autre du parcours d'un tramway sur une ligne donnée (ESKISEHIR). Les puissances demandées sont cependant ramenées par

une homothétie à respecter l'ordre de grandeur adopté dans cette étude. Ces profils ont servi de matière pour les méthodes d'optimisation faite et de manière de comparaison pour tester la robustesse et la validité des algorithmes de commande en ligne.

En général, nous avons mis en relief la nette amélioration en performance du groupe électrogène apportée par l'hybridation de la pile à combustible avec un élément de stockage tel les supercapacités. La diminution de la consommation atteint les 40% en comparaison avec le cas sans hybridation. Nous avons de plus montré qu'une méthode adéquate de gestion de cette hybridation est nécessaire pour optimiser le fonctionnement du groupe électrogène et récupérer l'énergie de freinage sans atteindre les limites de saturation ou d'épuisement de l'élément de stockage. La comparaison des résultats des différentes méthodes adoptées dans cette étude montre aussi que la performance de chaque méthode dépasse la simple capacité à récupérer toute l'énergie de freinage puisque nous avons obtenu des consommations différentes tout en récupérant toute cette énergie.

Une caractéristique de cette étude est que plusieurs domaines sont mis en jeu, allant de l'électricité à l'automatique en passant par l'optimisation avec la rigueur mathématique théorique nécessaire. Cette diversité qui a constitué l'originalité même de cette étude était difficile à gérer puisqu'il fallait acquérir un minimum de compétences dans chacun de ces domaines sans pour autant pouvoir approfondir dans un seul. Dans cette idée, cette étude peut s'ouvrir à de nombreuses perspectives à court ou à long terme.

Une perspective à court terme est l'affinement des programmes d'optimisation hors ligne et de commande en ligne en améliorant la performance numérique de ces algorithmes, une phase nécessaire avant leur intégration dans des contrôleurs embarqués.

Nous avons pris en considération dans notre étude les contraintes majeures relatives aux puissances et états d'énergies maximaux et minimaux de la pile et l'élément de stockage. Cependant d'autres contraintes peuvent être ajoutées notamment les contraintes liées aux limitations dynamiques de la pile à combustible par l'ajout d'une limite sur la dérivée de la puissance PAC.

L'application des algorithmes d'optimisation, notamment de l'algorithme génétique a montré

---

une faible utilisation de l'élément de stockage offrant ainsi la possibilité de modifier le dimensionnement de cet élément et éventuellement d'utiliser les résultats d'optimisation pour évaluer différents cas de dimensionnement.

L'application de l'algorithme génétique pour l'optimisation du système flou a montré la dépendance de cette méthode au profil utilisé dans cette optimisation. Cette observation constitue un axe de travail cherchant à quantifier le lien entre le profil envisagé et le résultat de l'optimisation obtenu. Cela permettra d'ajuster les paramètres du système flou suivant le type de mission effectuée. Nous avons commencé l'étude par une comparaison entre les deux profils utilisés. Cette comparaison doit être étendue par l'utilisation de nouveaux outils d'analyse (comme par exemple une analyse temps-échelle) et de nouveaux profils de mission réels ou imaginaires.

Enfin, une perspective importante est l'intégration des méthodes de gestion en ligne dans un simulateur complet en temps réel de la chaîne de traction. Cette tâche doit être accomplie avant et en parallèle à une phase de validation expérimentale.





# A

## Notions Thermodynamiques

### A.1 Formulations énergétiques

Les différentes formes d'énergie d'un système peuvent être réparties en deux classes, à savoir les formes d'énergie propres au système et les formes d'énergie échangées avec l'extérieur [Wat07]. Les diverses formes d'énergie propres au système,  $E$ , dépendent de son état et sont donc des fonctions d'état. Elles se décomposent en une énergie associée à l'état interne du système, énergie interne  $U$  à l'échelle microscopique et une énergie externe dépendant de la position et du mouvement du système, observable à l'échelle macroscopique. L'énergie externe est représentée par une énergie mécanique,  $E_m$ , qui n'est autre que la somme de l'énergie cinétique macroscopique,  $E_c$ , du système et de son énergie potentielle,  $E_p$  :

$$E = U + E_m \tag{A.1}$$

$$E_m = E_c + E_p \tag{A.2}$$

### A.2 Premier principe de la thermodynamique

L'énergie échangée avec l'extérieur comporte le travail,  $W$ , qui tient compte de l'énergie macroscopique transférée au système et la chaleur,  $Q$  qui représente l'énergie microscopique transférée au système. Ces deux grandeurs sont liées à la variation de l'énergie totale,  $E$  entre

deux états,  $S_1$  et  $S_2$  du système d'après le premier principe de la thermodynamique :

$$\Delta E = E_2 - E_1 = W_{1 \rightarrow 2} + Q_{1 \rightarrow 2} \quad (\text{A.3})$$

Ou bien, en remarquant que le terme du travail prend compte de l'énergie potentielle :

$$\Delta U + \Delta E_c = W + Q \quad (\text{A.4})$$

### A.3 Enthalpie

L'enthalpie,  $H$  est une fonction d'état de la thermodynamique, dont la variation permet d'exprimer la quantité de chaleur mise en jeu pendant la transformation isobare d'un système thermodynamique au cours de laquelle celui-ci reçoit ou fournit un travail mécanique.

$$H = U + P \cdot V \quad (\text{A.5})$$

où  $P$  et  $V$  sont respectivement la pression et le volume du système subissant la transformation.

### A.4 Entropie

L'entropie,  $S$  est une fonction d'état permettant de formuler le second principe de la thermodynamique. Toute transformation réelle s'effectue avec augmentation du désordre global (système et milieu extérieur) ; le désordre étant mesuré par l'entropie. On dit encore qu'il y a création d'entropie. L'expression moderne du second principe formalise cette création d'entropie par :

$$\Delta S_{\text{créée}} = \Delta S_{\text{système}} + \Delta S_{\text{extérieur}} > 0 \quad (\text{A.6})$$

Dans le cas de la transformation idéale réversible, il n'y a pas de création d'entropie :

$$\Delta S_{\text{créée}} = \Delta S_{\text{système}} + \Delta S_{\text{extérieur}} = 0 \quad (\text{A.7})$$

Avec :

$$\Delta S_{\text{système}} \begin{cases} = \frac{Q_{\text{rév}}}{T} & \text{pour une transformation réversible} \\ > \frac{Q_{\text{irrév}}}{T} & \text{pour une transformation irréversible} \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

Où  $Q$  est la quantité de chaleur échangée par un système à la température  $T$ .

## A.5 Enthalpie libre

L'enthalpie libre ou l'énergie libre de Gibbs ou plus simplement énergie de Gibbs,  $G$  est une fonction d'état définie dans le cas d'une transformation isotherme avec variation négligée d'énergie cinétique globale tel que :

$$G = H - T \cdot S = U + P \cdot V - T \cdot S \quad (\text{A.9})$$

Dans le cas d'un système où se produit une réaction chimique à pression constante et où l'on a ramené après réaction les produits à la température qu'avaient les réactifs, la variation de l'énergie de Gibbs,  $\Delta G$ , entre l'énergie finale après réaction,  $G_f$ , et initiale avant réaction,  $G_i$  est ainsi donnée par l'équation ??.

$$\Delta G = G_f - G_i = (H_f - T \cdot S_f) - (H_i - T \cdot S_i) = (U_f + P \cdot V_f - T \cdot S_f) - (U_i + P \cdot V_i - T \cdot S_i) \quad (\text{A.10})$$

En d'autre termes :

$$\Delta G = \Delta U + P \cdot \Delta V - T \cdot \Delta S \quad (\text{A.11})$$

Ainsi l'expression de  $\Delta G$  fait apparaître le terme correctif  $T \cdot \Delta S$ , représentant la différence entre l'énergie thermique des produits et des réactifs que l'on n'a pas récupérée.



## B

# Calcul des Puissances PAC et ES Corrigées dans le Cadre de l'Application de l'Algorithme Génétique

La puissance  $P_{PAC}(i)$  est donnée par le système flou en fonction de  $P_{dem}(i)$  et  $E(i)$ .

La puissance  $P_{ES}$  est calculée en respectant les contraintes de puissance maximale et minimale d'après l'équation suivante :

$$P_{ES}(i) = \max(P_{ES\_min}, \min(P_{dem}(i) - P_{PAC}(i), P_{ES\_max})); \quad (\text{B.1})$$

La puissance utile absorbée par l'élément de stockage  $P_S$  est donnée en prenant en considération les pertes du convertisseur et de l'élément de stockage :

$$P_S(i) = P_{ES}(i) + \text{Pertes}_{ES}(P_{ES}(i)) \quad (\text{B.2})$$

L'état de charge à l'instant  $i+1$  obtenu après fourniture ou absorption de la puissance  $P_S(i)$  tout en respectant les contraintes sur l'état de charge  $E_{min}$  et  $E_{max}$  est donné par l'équation suivante :

$$E(i+1) = \max(E_{min}, \min(E(i) - P_S(i) \cdot \Delta t, E_{max})) \quad (\text{B.3})$$

La puissance fournie ou absorbée par l'élément de stockage corrigée afin de tenir compte de la saturation de son état de charge devient alors :

$$P_{S\_cor}(i) = -\frac{E(i+1) - E(i)}{\Delta t} \quad (\text{B.4})$$

La puissance de l'élément de stockage au niveau du bus continu devient après correction :

$$P_{ES\_cor}(i) = P_{S\_cor}(i) - P_{ertesES}(P_{S\_cor}(i)); \quad (\text{B.5})$$

Enfin, tenant compte de la correction précédente effectuée sur la puissance  $P_{ES\_cor}$  et des limites maximale et minimale de la puissance  $P_{PAC\_max}$  et  $P_{PAC\_min}$ , la puissance corrigée de la pile à combustible est donnée par l'équation suivante :

$$P_{PAC\_cor}(i) = \min(\max(P_{dem}(i) - P_{ES\_cor}(i), P_{PAC\_min}), P_{PAC\_max}) \quad (\text{B.6})$$

Cela dit, la puissance réellement fournie par le groupe électrogène hybride  $P_{four}$  est alors :

$$P_{four} = P_{PAC\_cor}(i) + P_{ES\_cor}(i) \quad (\text{B.7})$$

# Bibliographie

- [ABM<sup>+</sup>95] J. C. Amphlett, R. M. Baumert, R. F. Mann, B. A. Peppley, P. R. Roberge, and T. J. Harris. Performance modelling of the ballard mark iv solid polymer electrolyte fuel. *Journal of the Electrochemical Society*, 142(1) :1–15, Jan. 1995.
- [And] M. Andre. European development of hybrid technology approaching efficient zero emission mobility. rapport LEN 9709, INRETS.
- [Arr07] M.Garcia Arregui. *Theoretical Study of a Power Generation Unit Based on the Hybridization of a Fuel Cell Stack and Ultracapacitors. Application to the Design of an Aircraft Emergency Electrical Network*. PhD thesis, INPT, Toulouse, Dec. 2007.
- [ASM02] Fuel cell power systems performance. An american national standard, American Society of Mechanical Engineers, Nov. 2002.
- [Bac69] F.T. Bacon. *Electrochim. Acta.*, 14(569), 1969.
- [BDBG07] J. Bernard, S. Delprat, F. N. Büchi, and T. M. Guerra. Fuel cell battery hybrid vehicle : From global optimization to real time power management. In *Proc. International Conference on Advances in Vehicle Control and Safety*, Buenos Aires, Feb. 2007.
- [Ber00] D. P. Bertsekas. *Dynamic Programming and Optimal Control*, volume 1. Athena Scientific, second edition edition, 2000.
- [Ber07] J. Bernard. *Véhicules Hybrides à Pile à Combustible : Dimensionnement et Stratégies de Commande*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, Dec. 2007.
- [BFHN00] F. Barbir, M. Fuchs, A. Husar, and J. Neutzler. Design and operational characteristics of automotive pem fuel cell stacks. In *Proc. of SAE 2000 World Congress*, USA, 2000.

- [BFR98] *Logique Floue*. Editions Cépaduès, 1998.
- [BGR00] A. Brahma, Y. Guezennec, and G. Rizzoni. Optimal energy management in series hybrid electric vehicles. In *Proc. of the American Control Conference*, pages 60–64, Chicago, USA, June 2000.
- [BLS87] R. Bosiere, F. Labrique, and G. Segulier. *Les Convertisseurs de l'Électronique de Puissance*, volume 3. Lavoisier, 1987.
- [BSFF02] P. Boucharel, M. Sans, M. Fadel, and J. Faucher. Hybrid vehicle efficiency optimization on a planned trip. In *Proc. of the FISITA world Conf.*, Helsinki, Finland, June 2002.
- [BT33] E. Baur and J. Tobler. *Z. Elektrochem. Angew. Phys. Chem.*, 39(180), 1933.
- [Buh94] H. Buhler. *Réglage Par Logique Floue*. Presses polytechniques et Universitaires Romandes, 1994.
- [Bur00] A. Burke. Ultracapacitors : why, how, and where is the technology. *Journal of power sources*, 91 :37–50, 2000.
- [But08] J. Butler. 2008 light duty vehicle survey. [www.fuelcelltoday.com](http://www.fuelcelltoday.com), Mai 2008.
- [BV92] D. M. Bernardi and M.W. Verbrugge. A mathematical model of the solid polymer electrolyte fuel cell. *Journal of Electrochemical Society*, pages 2477–91, 1992.
- [BWGR00] B. M. Baumann, G. Washington, B. C. Glenn, and G. Rizzoni. Mechatronic design and control of hybrid electric vehicles. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 5(1) :58–71, 2000.
- [CC01] C.C. Chan and K.T. Chau. *Modern Electric Vehicle Technology*. Oxford University Press, New York, 2001.
- [CC02] A. Carlos and C. A. Coello. Theoretical and numerical constraint handling techniques used with evolutionary algorithms : A survey of the state of the art. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 191 :1245–1287, 2002.
- [CFCS04] J. M. Correa, F.A. Farret, L.N. Canha, and M.G. Simoes. An electrochemical-based fuel-cell model suitable for electrical engineering automation approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Oct. 2004.
- [CFG03] J. M. Correa, F. A. Farret, J. R. Gomes, and M.G. Simoes. Simulation of fuel-cell stacks using a computer-controlled power rectifier with the purposes of actual high-power injection applications. *IEE Transactions on Industry Applications*, 2003.



- 
- [CL00] F. Cheong and R. Lai. Constraining the optimization of a fuzzy logic controller using an enhanced genetic algorithm. *IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics - Part B : Cybernetics*, 30(1), Feb. 2000.
- [CLF<sup>+</sup>05] S. Caux, J. Lachaize, M. Fadel, P. Schott, and L. Nicod. Modelling and control of a fuel cell system and its storage elements in transport applications. *Journal of Process Control*, 15 :481–491, Juin 2005.
- [CML06] P.A. Cornillon and E. Matzner-Lober. *Régression Théorie et applications*. Springer, 2006.
- [CNS05] W. Caisheng, M.H. Nehrir, and S.R. Shaw. Energy dynamic models and model validation for pem fuel cells using electrical circuits. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(2) :442–451, 2005.
- [CSH05] CSHPF. repérer et traiter les intoxications oxycarbonées. Technical report, Conseil Supérieur d’Hygiène Publique de France- Groupe des experts chargé d’élaborer les référentiels de la prise en charge des intoxications oxycarbonées, 2005.
- [DLGR04] S. Delprat, J. Lauber, T.M. Guerra, and J. Rimaux. Control of a parallel hybrid powertrain : Optimal control. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 53(3) :872–881, May 2004.
- [DP05] H. Douglas and P. Pillay. Sizing ultracapacitors for hybrid electric vehicles. In *Proc. IECON*, North Carolina, USA, Nov. 2005.
- [Dur07] M. Durkin. The great global warming swindle. *Documentaire*, 2007.
- [EG004] Fuel cell handbook (seventh edition). Technical report, U.S. Department of Energy - Office of Fossil Energy - National Energy Technology Laboratory, Nov. 2004.
- [EGGE05] M. Ehsani, Y. Gao, S.E. Gay, and Al. Emadi. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles - Fundamentals, Theory, and Design*. CRC Press, 2005.
- [EIA07] EIA. International energy annual 2005. Technical report, Energy Information Administration, 2007.
- [Fau06] J. Faucher. *Les Plans d’Expériences pour le Réglage de Commandes à Base de Logique Floue*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, Sept. 2006.
- [FF99] J. P. Ferrieux and F. Forest. *Alimentations à Découpage - Convertisseurs à Résonance*. Dunod, 1999.

- [FG03] P. Famouri and R.S. Gemmen. Electrochemical circuit model of a pam fuel cell. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2003.
- [FK01] C.R. Ferguson and A.T. Kirkpatrick. *Internal Combustion Engines - Applied Thermo-Sciences*. John Wiley & Sons, 2001.
- [FRD04] W. Friede, S. Rael, and Bernard Davat. Mathematical model and characterization of the transient behavior of a pem fuel cell. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(5), Sept. 2004.
- [FWMB00] M. H. Fronk, D. L. Wetter, D. A. Masten, and A. Bosco. Pem fuel cell system solutions for transportation. In *Proc. of SAE 2000 World Congress*, USA, 2000.
- [GEM05] Y. Gao, M. Ehsani, and J.M. Miller. Hybrid electric vehicle : Overview and state of the art. In *Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pages 307–314, Dubrovnik, Croatia, June 2005.
- [GIE07] GIEC. Climate change 2007. <http://www.ipcc.ch>, 2007.
- [GME<sup>+</sup>03] Y. Gao, H. Moghbelli, M. Ehsani, G. Frazier, J. Kajs, and S. Bayne. Investigation of high-energy and high-power hybrid energy storage systems for military vehicle application. *Society of Automotive Engineers*, 2003.
- [Gol89] D.E. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison Wesley, 1989.
- [Gro74] W.R. Grove. *The Correlation of Physical Forces, 6th edition*. Longmans, Green, London, 1874.
- [HCF<sup>+</sup>05] Harel, Candusso, François, Pera, Hissel, and Kauffmann. Expérimentations sur piles à combustible à membranes de faibles puissances. rapport LTE 0503, FEMTO-ST, Belfort, 2005.
- [HCHF06] W. Hankache, S. Caux, D. Hissel, and M. Fadel. Simplified electrical model tuned for actual controlled pemfc. In *Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Windsor, UK, Sept. 2006.
- [HE94] W.R. Hwang and W. E. Thompson. Design of intelligent fuzzy logic controllers using genetic algorithms. In *in Proc. of the third IEEE Conference on Fuzzy Systems*, pages 1383–1388, Orlando, June 1994.
- [HFJM03] Harel, François, Jemei, and Moratin. Conception et réalisation d’un banc d’essais

- 
- pour piles à combustible à membrane de faibles puissances. rapport LTE 0310, FEMTO-ST, Belfort, 2003.
- [His98] D. Hissel. *Contribution à la Commande de Dispositifs Electrotechniques par Logique Floue*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1998.
- [Hol62] J Holland. Outline for a logical theory of adaptive systems. *Journal of the Association of Computing Machinery*, 1962.
- [HPK04] D. Hissel, M. Pera, and J. Kauffmann. Diagnosis of automotive fuel cell power generators. *Journal of Power Sources*, 128 :239–246, 2004.
- [Iqb03] M. T. Iqbal. Modeling and control of a wind fuel cell hybrid energy system. *Journal of Renewable Energy*, pages 223–237, 2003.
- [Jea01] Jeanneret. Présentation de la bibliothèque de simulation de véhicules vehlib version 1.0. rapport LTE 0102, INRETS, 2001.
- [JHPK02] S. Jemeï, D. Hissel, M.C. Péra, and J.M. Kauffmann. Black-box modeling of proton exchange membrane fuel cell generators. In *Proc. of the IEEE Industrial Electronics Conference*, Spain, 2002.
- [Jon79] H. Jonas. *le Principe Responsabilité - Une Éthique pour la Civilisation Technologique*. Flammarion, 2008 edition, 1979.
- [JTB<sup>+</sup>99] B. Jeanneret, R. Trigui, F. Badin, F. Harel, F. Damemme, and J. Lavy. New hybrids concept simulation tools, evaluation on the toyota prius car evs16. 1999.
- [Kan04] H. Abou Kandil. *La Commande Optimale des Systèmes Dynamiques*. Systèmes Automatiques. Lavoisier, 2004.
- [KKdJ<sup>+</sup>05] M. Koot, J.T.B.A. Kessels, B. de Jager, W.P.M.H. Heemels, P.P.J. van den Bosch, and M. Steinbuch. Energy management strategies for vehicular electric power systems. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 54(3) :771–782, May 2005.
- [KUA06] M. C. Kisacikoglu, M. Uzunoglu, and M. S. Alam. Fuzzy logic control of a fuel cell/ultra-capacitor hybrid vehicular power system. In *Proc. of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pages 1–5, Sept. 2006.
- [KUA07] M. C. Kisacikoglu, M. Uzunoglu, and M. S. Alam. Fuzzy logic control of a fuel cell/battery/ultra-capacitor hybrid vehicular power system. In *Proc. of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pages 591–596, Sept. 2007.

- [Lac04] J. Lachaize. *Etude des Stratégies et des Structures de Commande pour le Pilotage des Systèmes Energétiques à Pile à Combustible destinés à la traction*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, Sept. 2004.
- [LD03] J. Larminie and A. Dicks. *Fuel Cell Systems Explained, Second Edition*. John Wiley & Sons, 2003.
- [Lem90] R. Lemons. Fuel cells for transportation. *Journal of Power Sources*, 29 :251–264, 1990.
- [LFC<sup>+</sup>03] J. Lachaize, M. Fadel, S. Caux, P. Shott, and L. Nicaud. Modelling and control of a fuel cell system for transport applications. In *Proc. IFAC*, Shanghai, Chine, Octobre 2003.
- [LKSK00] H. D. Lee, E. S. Koo, S. K. Sul, and J. S. Kim. Torque control strategy for a parallel hybrid vehicle using fuzzy logic. *IEEE Ind. Appl. Mag.*, 6(6) :33–38, 2000.
- [LN95a] D. A. Linkens and H. O. Nyonggesa. Genetic algorithms for fuzzy control - part 1 : Offline system development and application. *Proc. Inst. Elect. Eng. Contr. Theory Applicat.*, 142 :161–176, May 1995.
- [LN95b] D. A. Linkens and H. O. Nyonggesa. Genetic algorithms for fuzzy control - part 2 : Online system development and application. *Proc. Inst. Elect. Eng. Contr. Theory Applicat.*, 142 :177–185, May 1995.
- [LPGK03] C. Lin, H. Peng, J. Grizzle, and J. Kang. Power management strategy for a parallel hybrid electric truck. *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 11(6) :839–849, Nov. 2003.
- [LW05] R. Langari and J. S. Won. Intelligent energy management agent for a parallel hybrid vehicle - part i : System architecture and design of the driving situation identification process. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 54(3) :925–934, May 2005.
- [MA75] E. Mamdami and S. Assilian. An experimental in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 1975.
- [Mah08] B. Maher. Ultracapacitors and the hybrid electric vehicle. [www.maxwell.com](http://www.maxwell.com), 2008.
- [Max] Maxwell technologie ultracapacitors. [www.maxwell.com](http://www.maxwell.com).
- [MB03] D.A. Masten and A.D. Bosco. System design for vehicle applications : Gm/opel. In W. Vielstich, H.A. Gasteiger, and A. Lamm, editors, *Handbook of Fuel Cells -*

- 
- Fundamentals, Technology and Applications*, volume 4, pages 714–724. John Wiley & Sons, 2003.
- [MC01] P. Melin and O. Castillo. Intelligent control of complex electrochemical systems with a neuro-fuzzy-genetic approach. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 48(5) :951–955, 2001.
- [Mic92] Z. Michalewicz. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolutionary Programs*. AI Series. New York, 1992.
- [ML89] L. Mond and C. Langer. In *Proc. R. Soc.*, volume 46, London, 1889.
- [MM04] K. Mauritz and R. Moore. State of understanding of nafion. *Chem. Rev.*, 104 :4535–4585, 2004.
- [NL94] K. C. Ng and Y. Li. Design of sophisticated fuzzy logic controllers using genetic algorithms. *Proc. 3rd IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems*, pages 1708–1712, 1994.
- [PF02] M.L. Perry and T.F. Fuller. A historical perspective of fuel cell technology in the 20th century. *Journal of The electrochemical Society*, 149 :59–67, 2002.
- [PK91] D. T. Pham and D. Karaboga. Optimum design of fuzzy logic controllers using genetic algorithms. *J. Syst. Eng.*, 1(2) :114–118, 1991.
- [Pou07] A. Poursamad. Design of genetic-fuzzy control strategy for parallel hybrid electric vehicles. *Control Engineering Practice*, 2007.
- [Pow] Powerex power semiconductors. <http://www.pwr.com/>.
- [PPS02] J. T. Pukurshpan, H. Peng, and A. G. Stefanopoulou. Simulation and analysis of transient fuel cell system performance based on a dynamic reactant flow model. In *Proc. of ASME IMECE*, pages 17–22, New Orleans, USA, 2002.
- [RGG<sup>+</sup>03] P. Rodatz, O. Garcia, L. Guzzella, F. Buchi, M. Bartschi, A. Tsukada, P. Dietrich, R. Kotz, G. Scherer, and A. Wokaun. Performance and operational characteristics of a hybrid vehicle powered by fuel cells and supercapacitors. *SAE transactions*, 112(3) :692–703, 2003.
- [RL01] A. Rowe and X. Li. Mathematical modeling of proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, pages 82–96, 2001.
- [RPS05] P. Rodatz, G. Paganelli, and A. Sciarretta. Optimal power management of an experimental fuel cell supercapacitor-powered hybrid vehicle. *Journal of Control Engineering Practice*, 13(1) :41–53, 2005.

- [Sal07] F. R. Salmasi. Control strategies for hybrid electric vehicles : Evolution, classification, comparison, and future trends. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 56(5) :2393–2404, Sept. 2007.
- [SHHM06] S.Caux, W. Hankache, D. Hissel, and M.Fadel. Simplified fuel cell system model identification. In *Proc. IFAC Symposium on Power Plants and Power Systems Control*, Kananaskis, Canada, June 2006.
- [SW77] A. P. Sage and C. C. White. *Optimum Systems Control*. Prentice Hall, 1977.
- [SWG93] T.E. Springer, M. S. Wilson, and S. Gottesfeld. Modeling and experimental diagnostics in polymer electrolyte fuel cells. *Journal of Electrochemical Society*, pages 3513–26, 1993.
- [Tek04] M. Tekin. *Contribution à l’Optimisation Énergétique d’un Système Pile à Combustible Embarqué*. PhD thesis, Université de Franche-Compte, Belfort, Dec. 2004.
- [THPK04] M. Tekin, D. Hissel, M. Pera, and J. Kauffman. Energy consumption reduction of a pem fuel cell motor-compressor group thanks to efficient control laws. In *Proc. FDFC*, Belfort, France, 2004.
- [THPK06] M. Tekin, D. Hissel, M.C. Pera, and J.M. Kauffmann. Energy consumption reduction of a pem fuel cell motor-compressor group thanks to efficient control laws. *Journal of Power Sources*, 156(1) :57–63, May 2006.
- [TJB04] R. Trigui, B. Jeanneret, and F. Badin. Modélisation systémique de véhicules hybrides en vue de la prédiction de leurs performances Énergétiques et dynamiques, construction de la bibliothèque de modèles vehlib. *Revue Recherche Transports Sécurité*, (83), 2004.
- [VSP06] A. Vahidi, A. Stefanopoulou, and H. Peng. Current management in a hybrid fuel cell power system : A model-predictive control approach. *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 14(6) :1047–1057, Nov. 2006.
- [Wak98] E.H. Wakefield. *History of the Electric Automobile : Hybrid Electric Vehicles*. Society of Automotive Engineers (SAE), 1998.
- [Wat07] A. Watzky. *Thermodynamique macroscopique : A l’usage des étudiants en sciences de l’ingénieur*. De Boeck, septembre 2007.
- [WBS<sup>+</sup>98] M. Wöhr, K. Bolwin, W. Schnurnberger, M. Fischer, W. Neubrand, and G. Eigen-

- 
- berger. Dynamic modeling and simulation of a polymer membrane fuel cell including mass transport limitation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1998.
- [WL05] J. S. Won and R. Langari. Intelligent energy management agent for a parallel hybrid vehicle - part ii : Torque distribution, charge sustenance strategies, and performance results. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 54(3) :935–952, May 2005.
- [WY06a] A. Wang and W. Yang. Design of energy management strategy in hybrid vehicles by evolutionary fuzzy system - part i : Fuzzy logic controller development. In *Proc. of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pages 8324–8328, China, June 2006.
- [WY06b] A. Wang and W. Yang. Design of energy management strategy in hybrid vehicles by evolutionary fuzzy system - part ii : Tuning fuzzy controller by genetic algorithms. In *Proc. of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pages 8329–8333, China, June 2006.
- [You03] K. Youngho. Ultracapacitor technology powers electronic circuits. *Power Electronics Technology*, Oct. 2003.
- [YZZ06] J. Yao, Z. Zhong, and S. Zechang. A fuzzy logic based regenerative braking regulation for a fuel cell bus. In *Proc. of the IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, pages 22 – 25, Dec. 2006.
- [Zad65] L. Zadeh. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8 :29–44, 1965.
- [ZCWW06] Y. Zhu, Y. Chen, Z. Wu, and A. Wang. optimisation design of an energy management strategy for hybrid vehicles. *Int. J. Alternative Propulsion*, 1(1) :47–62, 2006.
- [ZH07] Q. Zeng and J. Huang. the design and simulation of fuzzy logic controller for parallel hybrid electric vehicles. In *Proc. of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*, pages 908–912, China, 2007.





## Résumé

L'étude porte sur la gestion de la distribution instantanée de la puissance entre une pile à combustible et un élément de stockage afin d'assurer la puissance électrique nécessaire à la traction d'un véhicule électrique hybride. L'objectif visé est la minimisation de la consommation d'hydrogène sur un cycle donné. Le problème est formulé en tant que problème d'optimisation globale sous contraintes. Dans une première approche, le système est décrit sous forme d'une équation dynamique discrétisée et un algorithme de programmation dynamique est appliqué. Une seconde approche consiste à minimiser le hamiltonien après avoir approché le critère coût par une fonction polynomiale. Ces méthodes nécessitent la connaissance a priori du profil de puissance demandée et se classent parmi les méthodes d'optimisation hors ligne. Pour une gestion en ligne de l'énergie, nous avons appliqué un système de décision à base de règles floues. Les fonctions d'appartenance des entrées et sorties du système flou sont optimisés à l'aide d'un algorithme génétique. Afin d'appliquer les stratégies évoquées, un bilan énergétique du groupe électrogène formé de la pile et ses auxiliaires, de l'élément de stockage et des convertisseurs statiques est effectué.

**Mots-clés:** Modélisation, optimisation sous contraintes, programmation dynamique, commande optimale, logique floue, algorithme génétique, véhicule électrique hybride, pile à combustible, énergie renouvelable.

## Abstract

The study focuses on the power distribution management between a fuel cells stack and a supercapacitor pack in order to ensure the power demand in a hybrid vehicle. The goal is to minimize the hydrogen consumption on a given cycle. The problem is formulated as a global optimization problem under constraints. In a first approach, the system is described with a discretized dynamic equation and a dynamic programming algorithm is applied. A second approach is to minimize the Hamiltonian after having approached the cost criterion by a polynomial function. These methods require a priori knowledge of the power demand profile and are therefore

considered as offline optimization methods. For an online energy management, we applied a decision making system based on fuzzy rules. Inputs and output membership functions of the fuzzy system are optimized using a genetic algorithm. In order to implement the outlined strategies, efficiency of the elements of the power train formed by the fuel cells stack and auxiliaries, the storage element and the static converters is characterized.

**Keywords:** Modelling, optimization, dynamic programming, optimal control, fuzzy logic, genetic algorithms, hybrid vehicles, fuel cells, renewable energy.