



HAL
open science

Adaptation des lois de gestion d'énergie des véhicules hybrides suivant le profil de mission suivi

Alexandra Dubray

► **To cite this version:**

Alexandra Dubray. Adaptation des lois de gestion d'énergie des véhicules hybrides suivant le profil de mission suivi. Automatique / Robotique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2002. Français. NNT: . tel-00411430

HAL Id: tel-00411430

<https://theses.hal.science/tel-00411430>

Submitted on 27 Aug 2009

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

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

INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

N° attribué par la bibliothèque

/ / / / / / / / / / / / / / / /

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'INPG

Spécialité : « Automatique Productive »

préparée au **Laboratoire d'Automatique de Grenoble** dans le cadre de
**l'Ecole Doctorale « Electronique, Electrotechnique, Automatique,
Télécommunications, Signal »**

présentée et soutenue publiquement

par

Alexandra Dubray

le 20 septembre 2002

**Adaptation des lois de gestion d'énergie des véhicules
hybrides suivant le profil de mission suivi**

Directeur de thèse : Sylviane Gentil

JURY

M. A. Barraud,

M. B. Dubuisson,

M. F. Badin,

Mme S. Gentil,

M. P. Béguery,

Président

Rapporteur

Rapporteur

Directeur de thèse

Examineur

TABLE DES MATIERES.

<u>LISTE DES FIGURES.....</u>	<u>7</u>
<u>LISTE DES TABLEAUX.....</u>	<u>15</u>
<u>GLOSSAIRE.....</u>	<u>19</u>
<u>NOTATIONS.....</u>	<u>25</u>
<u>INTRODUCTION GÉNÉRALE.....</u>	<u>29</u>
<u>CHAPITRE I - PRÉSENTATION DES VÉHICULES ELECTRIQUES HYBRIDES.</u>	<u>33</u>
1 - Hybride série ou hybride parallèle ?.....	35
1.1 - Le véhicule électrique et le véhicule thermique conventionnel.	35
1.2 - L'hybride série.....	36
1.3 - L'hybride parallèle.	37
1.4 - La combinaison des deux.....	38
2 - Les modes de fonctionnement.....	38
2.1 - Les modes de fonctionnement à une seule source d'énergie.	39
2.2 - Les modes de fonctionnement hybrides.	39
2.3 - Le freinage récupératif.....	39
3 - Principaux types de véhicules hybrides.	40
3.1 - Le véhicule électrique avec prolongateur d'autonomie.	41
3.2 - Le véhicule thermique assisté électriquement.....	41
3.3 - Le véhicule électrique hybride proprement dit.	42
4 - Historique des véhicules hybrides Renault.....	42
4.1 - La première voiture hybride Renault : NEXT.	42
4.2 - Le programme VERT.	43
4.3 - Le projet HYMNE.....	44
4.4 - Le projet FEVER.	45
5 - Les lois de gestion d'énergie.....	45
5.1 - Principe de la commande d'un véhicule hybride.	45
5.2 - Présentation générale des lois de gestion d'énergie.....	46
5.3 - Etat de l'art des lois de gestion d'énergie.....	47
5.4 - Conclusion.....	50
6 - Conclusion : objectifs de la thèse.	50
<u>CHAPITRE II - LE BUS HYBRIDE ET SON MODÈLE DE SIMULATION.</u>	<u>53</u>

1 - Le sujet d'application : le bus hybride.	55
1.1 - Le dimensionnement.	56
1.2 - Le modèle de simulation.....	57
2 - Présentation des principaux organes.....	58
2.1 - Le générateur électrique.	58
2.2 - La batterie.	61
2.3 - Les moteurs électriques de traction.....	63
3 - Le modèle des auxiliaires.	64
3.1 - Description du modèle « taux de charge ».....	64
3.2 - Description du modèle « porte ».....	64
3.3 - Présentation des auxiliaires du véhicule.	65
3.4 - Visualisation des profils d'auxiliaires obtenus.	66
4 - Le modèle du conducteur.	67
4.1 - Notion de cycle et de trajet.....	68
4.2 - Principe du modèle conducteur.....	69
5 - Conclusion.....	70
<u>CHAPITRE III - OPTIMISATION DES LOIS DE GESTION D'ENERGIE.....</u>	71
1 - Méthode locale ou méthode globale ?.....	73
1.1 - Optimisation locale.....	73
1.2 - Optimisation globale.....	74
1.3 - La méthode retenue.....	74
2 - Description du problème d'optimisation.	75
2.1 - La batterie.	75
2.2 - Le générateur électrique.	76
2.3 - Formalisation du problème d'optimisation.	77
3 - Application du principe du maximum.	78
3.1 - Application à l'hybride série.....	78
3.2 - Prise en compte des contraintes sur la commande.	78
3.3 - Prise en compte de contraintes sur l'état.	81
4 - Passage d'une conception hors-ligne à une commande embarquée.....	84
4.1 - Prise en compte du confort du conducteur.	85

4.2 - Détermination du K en-ligne.	86
4.3 - Impact en terme de consommation.	87
5 - Conclusion.	91
<u>CHAPITRE IV - ADAPTATION DES LOIS DE GESTION D'ÉNERGIE AU</u>	
<u>PARCOURS EFFECTUÉ.</u>	93
1 - L'organisation proposée.	96
1.1 - Le niveau instantané.	96
1.2 - Le niveau d'apprentissage.	97
1.3 - Le niveau de supervision locale.	97
2 - Reproductibilité des cycles.	98
3 - Le module « suivi de SOC ».	100
3.1 - Utilisation de correcteurs proportionnels.	100
3.2 - Généralisation par continuité	101
3.3 - Ajout d'une action intégrale.	103
4 - Principe de l'apprentissage du parcours.	104
4.1 - La phase de reconnaissance du trajet suivi.	105
4.2 - La phase d'obtention du profil d'état de charge désiré.	106
4.3 - La phase d'évaluation de la réalisation.	110
4.4 - Intégration de la notion de reproductibilité dans les connaissances acquises.	116
5 - Conclusion.	117
<u>CHAPITRE V - VALIDATION DES RÉSULTATS.</u>	119
1 - Description de la campagne d'essais.	121
1.1 - Moyens utilisés.	122
1.2 - Résultats obtenus.	124
2 - Application au bus hybride sans évaluation de la reproductibilité.	126
2.1 - Reproductibilité des réalisations d'un même parcours.	126
2.2 - Résultats obtenus pour les parcours du « matin » et du « soir ».	127
3 - Prise en compte de la non-reproductibilité des réalisations.	132
3.1 - Evaluation de la reproductibilité.	133
3.2 - Prise en compte des informations de reproductibilité dans l'acquisition des connaissances.	136

3.3 - Résultats obtenus en terme de consommation.	136
4 - Perspectives pour les autres véhicules hybrides.	140
4.1 - Les applications se rapprochant de celle du bus.	141
4.2 - Les systèmes de communication embarqués.	143
5 - Conclusion.	145
<u>BILAN ET PERSPECTIVES.</u>	147
<u>BIBLIOGRAPHIE.</u>	153
<u>ANNEXE A - LES PRINCIPAUX THÉORÈMES DU PRINCIPE DU MAXIMUM.</u>	163
1 - Hypothèses générales.	165
1.1 - Hypothèses générales.	165
1.2 - Le problème de commande optimale.	165
2 - Cas des problèmes autonomes (théorème 1).	166
3 - Cas des problèmes non autonomes (théorème 2).	166
4 - Prise en compte d'un coût final dans la fonction coût (théorème 3).	167
4.1 - Définitions et hypothèses.	167
4.2 - Résolution.	168
4.3 - Théorème.	168
5 - Prise en compte de contraintes sur la commande dépendant de l'état (théorème 4).	169
5.1 - Le problème.	169
5.2 - Définitions et hypothèses.	169
5.3 - Théorème.	170
6 - Principe du maximum restreint (théorème 5).	171
6.1 - Le problème.	171
6.2 - Définitions et hypothèses.	171
6.3 - Le principe du maximum restreint.	172
<u>ANNEXE B - LES CYCLES UTILISÉS.</u>	175
1 - Le suivi de bus à Saint Quentin en Yvelines.	177
2 - Les « essais Laguna ».	179
2.1 - Essai « réalisation d'un parcours de type bus ».	180
2.2 - Essai « réalisation de parcours domicile-travail ».	180
3 - Les « essais Chambéry ».	183

LISTE DES FIGURES.

Figure I.1 – Principe du véhicule thermique conventionnel.	36
Figure I.2 – Principe du véhicule électrique.	36
Figure I.3 - Principe de l’architecture série.	37
Figure I.4 – Principe de l’architecture parallèle.	37
Figure I.5 - Principe de l’architecture à dérivation de puissance.	38
Figure I.6 – Spectre des différents types d’hybrides.	41
Figure I.7 – Le prototype VERT.	43
Figure I.8 – Le prototype 3 du projet HYMNE.	44
Figure I.9 – Le dernier prototype du projet HYMNE.	44
Figure I.10 – Schéma général de la commande d’un véhicule électrique hybride.	46
Figure I.11 – Exemples de fonctionnement du véhicule avec maintien de l’état de charge SOC (haut) et décharge de la batterie (bas).	47
Figure II.1 – Modèle global du véhicule hybride série et de sa commande.	57
Figure II.2 – Cartographie de consommation spécifique du moteur thermique.	59
Figure II.3 – Courbe des meilleurs points de fonctionnement du moteur thermique.	60
Figure II.4 - Modèle batterie utilisé.	61
Figure II.5 – Tension à vide de la batterie E_0	62
Figure II.6 – Résistance interne de la batterie R_0	62
Figure II.7 - Principe du modèle « taux de charge ».	64
Figure II.8 - Principe du modèle « porte ».	65
Figure II.9 - Exemple de profils d’auxiliaires en hiver.	66
Figure II.10 - Exemple de profils d’auxiliaires en été.	67
Figure II.11 - Exemples de différents profils de vitesse.	68
Figure II.12 - Principe du modèle du conducteur.	69
Figure II.13 – Schéma général de la commande d’un hybride série.	70
Figure III.1 - Architecture série.	75
Figure III.2 - Exemple de cartographie de commande (courbes $K=$ constante).	79
Figure III.3 – Consommation spécifique du générateur électrique.	80
Figure III.4 - Etape 1 : résolution sans contraintes d’état de charge.	83
Figure III.5 - Etape 2 : décomposition en sous-problèmes.	83
Figure III.6 - Etape 3 : résolution des sous-problèmes.	84

Figure III.7 – Exemple de profil de puissance électrique demandée.	85
Figure III.8 – Démarrages/arrêts du moteur thermique préconisés par la méthode d’optimisation.	86
Figure III.9 – Démarrages/arrêts du moteur thermique après l’introduction des lois de confort.	86
Figure III.10 – Variation de l’état de charge de la batterie au cours de la répétition d’un même cycle.	88
Figure III.11 – Estimation de la consommation par régression linéaire.	88
Figure III.12 – Exemple de fonction utilisée dans une application en-ligne des résultats théoriques.	90
Figure IV.1 – Gestion de l’état de charge de la batterie pour différents types de lois de gestion de l’énergie.	95
Figure IV.2 – Organisation de la commande du véhicule hybride.	96
Figure IV.3 – Représentation de plusieurs réalisations d’un même trajet (trajet n°1).	98
Figure IV.4 – Représentation de plusieurs réalisations d’un même trajet (trajet n°2).	99
Figure IV.5 – Fonctionnement du module de « suivi de SOC » en utilisant le correcteur proportionnel.	101
Figure IV.6 - Exemple de fonction utilisée.	101
Figure IV.7 - Fonctionnement du module de « suivi de SOC » en utilisant un correcteur continu.	102
Figure IV.8 - Fonctionnement du module de « suivi de SOC » en utilisant un profil désiré non constant.	102
Figure IV.9 - Fonctionnement du module de « suivi de SOC » en utilisant un profil désiré non constant et une mauvaise appréciation a priori de la valeur de K.	103
Figure IV.10 - Fonctionnement du module de « suivi de SOC » en ajoutant une action intégrale.	103
Figure IV.11 - Fonctionnement du module de « suivi de SOC » en ajoutant une action intégrale (mauvais appréciation a priori de la valeur de K).	104
Figure IV.12 – Organisation des lois de gestion d’énergie avec prise en compte du trajet effectué.	105
Figure IV.13 – Profils d’état de charge théoriques obtenus par augmentation de la période d’échantillonnage (trajet N°1).	106
Figure IV.14 – Profil d’état de charge théorique obtenu par augmentation de la période d’échantillonnage (trajet N°2).	107
Figure IV.15 – Profil d’état de charge théorique obtenu par utilisation d’une puissance moyenne sur une fenêtre de 50 (rouge), 100 (vert) et 500 (bleu) m pour les trajets N°1 et N°2.	108

Figure IV.16 – Exemple d’histogrammes obtenus pour une des réalisations des trajets N°1 et N°2 avec des cycles élémentaires de 1 km.....	108
Figure IV.17 – Exemple de création d’histogrammes pour le 1 ^{er} kilomètre d’une des réalisations du trajet N°1.....	109
Figure IV.18 – Reconstitution d’un profil de puissance à partir d’un histogramme.....	109
Figure IV.19 – Profil d’état de charge théorique obtenu par utilisation d’histogrammes de puissance sur 500 (rouge) et 1000 (vert) m pour une réalisation des trajets N°1 et N°2.....	110
Figure IV.20 – Illustration des résultats (arbre binaire et partition de l’espace) issus de la méthode CART.....	112
Figure IV.21 – Comparaison des profils de vitesse de deux réalisations d’un même parcours.	114
Figure V.1 – Les différentes phases des lois de gestion d’énergie développées.....	121
Figure V.2 – Exemple de profils de vitesse correspondant au parcours du matin et au parcours du soir.	124
Figure V.3 – Présentation de l’interface développée.....	125
Figure V.4 – Profil d’état de charge théorique en fonction de la distance parcourue pour les réalisations du parcours du matin.	126
Figure V.5 – Variations de l’état de charge par kilomètre pour les réalisations du parcours matin.	127
Figure V.6 – Profil de SOC et valeur de K obtenus pour les 4 premières réalisations du parcours du matin.....	130
Figure V.7 – Profil de SOC et valeur de K obtenus pour les 4 premières réalisations du parcours du soir.	131
Figure V.8 – Résultats de consommation obtenus précédemment pour le parcours du matin.	132
Figure V.9 – Résultats de consommation obtenus précédemment pour le parcours du soir.	132
Figure V.10 – Arbre de décision obtenu pour le parcours du matin.	134
Figure V.11 – Visualisation des trois classes pour le parcours du matin dans le plan des deux variables explicatives choisies.	135
Figure V.12 – Visualisation des trois classes pour le parcours du soir dans le plan des deux variables explicatives choisies.	135
Figure V.13 – Courbe d’obtention du poids de la réalisation suivant sa reproductibilité.....	136
Figure V.14 – Consommation sans (noir) et avec (rouge) prise en compte de la reproductibilité pour l’ensemble des réalisations du parcours du matin (à gauche) et du parcours du soir (à droite).....	137

LISTE DES FIGURES.

Figure V.15 – Consommation sans (noir) et avec (rouge) prise en compte de la reproductibilité uniquement pour les réalisations reproductibles du parcours du matin (à gauche) et du parcours du soir (à droite).	138
Figure V.16 – Consommation sans (noir) et avec (rouge) prise en compte de la reproductibilité en ne considérant qu’une seule classe.	138
Figure V.17 – Consommation sans (noir) et avec (rouge) prise en compte de la reproductibilité en considérant deux classes.	139
Figure V.18 – Exemple de la détection d’une succession de réalisations non reproductibles pour considérer deux classes.	140
Figure V.19 – Quelques réalisations du parcours domicile-Technocentre du conducteur N°1.	141
Figure V.20 – Quelques réalisations du parcours domicile-Technocentre du conducteur N°3.	142
Figure V.21 – Quelques réalisations du parcours domicile-Technocentre du conducteur N°4.	142
Figure B.1 – Ligne N°1.	177
Figure B.2 – Ligne N°2 et N°3 (aller-retour effectué).	177
Figure B.3 – Visualisation des réalisations de la ligne N°1.	178
Figure B.4 – Visualisation des réalisations de la ligne N°2.	178
Figure B.5 – Visualisation des réalisations de la ligne N°3.	179
Figure B.6 – Visualisation de quelques réalisations du parcours défini.	180
Figure B.7 – Visualisation d’une réalisation de chaque parcours du conducteur N°1.	181
Figure B.8 – Visualisation d’une réalisation de chaque parcours du conducteur N°1’.	182
Figure B.9 – Visualisation d’une réalisation de chaque parcours du conducteur N°2.	182
Figure B.10 – Visualisation d’une réalisation de chaque parcours du conducteur N°2’.	182
Figure B.11 – Visualisation d’une réalisation de chaque parcours du conducteur N°3.	182
Figure B.12 – Visualisation d’une réalisation de chaque parcours du conducteur N°4.	183
Figure B.13 – Visualisation d’une réalisation de chaque parcours du conducteur N°5.	183
Figure B.14 – Visualisation d’une réalisation de chaque parcours du conducteur N°6.	183
Figure B.15 – Profils de vitesse (km/h) en fonction du temps (s) du parcours du matin.	186

LISTE DES FIGURES.

Figure B.16 – Profils de vitesse (km/h) en fonction du temps (s) du
parcours du soir. 187

LISTE DES FIGURES.

LISTE DES TABLEAUX.

Tableau II.1 - Normes européennes de pollution applicables aux moteurs diesels des véhicules de transport en commun en g/kWh.....	55
Tableau III.1 - Impact des lois de gestion sur la consommation du véhicule et le nombre moyen de commutations du moteur thermique.	91
Tableau V.1 – Exemple de données obtenues.....	123
Tableau V.2 – Application des différentes lois de gestion d'énergie sur le parcours du matin en l'absence d'évaluation de la réalisation (base 100 pour la consommation correspondant aux lois classiques)....	128
Tableau V.3 – Application des différentes lois de gestion d'énergie sur le parcours du soir en l'absence d'évaluation de la réalisation (base 100 pour la consommation correspondant aux lois classiques).	129
Tableau V.4 – Classification a priori des réalisations du parcours matin en trois classes : reproductible (R), non reproductible (NR) et ambigu (Amb).....	133
Tableau B.1 – Récapitulatif de la base d'essais obtenue.	181
Tableau B.2 – Principales caractéristiques du parcours du matin.	184
Tableau B.3 – Principales caractéristiques du parcours du soir.....	185

LISTE DES TABLEAUX.

GLOSSAIRE.

Aquazole :

Emulsion d'eau (13%) et de gazole utilisée pour diminuer les particules, l'opacité des fumées et les oxydes d'azote.

Architecture :

Assemblage des différents éléments mécaniques et électriques au sein du véhicule hybride. Les deux architectures classiques sont l'hybride série (une seule propulsion électrique) et l'hybride parallèle (une double propulsion électrique et thermique).

Boîte de vitesse :

Ensemble d'arbres et pignons capable d'adapter le régime moteur au besoin de la conduite. Elle est dite automatique quand le conducteur est dispensé de débrayer et de manœuvrer le levier.

Chaîne de traction :

Ensemble des éléments situés entre la (ou les) source(s) d'énergie et les roues.

Consommation spécifique :

Consommation par unité d'énergie produite exprimée pour un moteur thermique en g/kWh.

CVT (Continuously Variable Transmission) :

Variateurs modifiant la vitesse de façon continue (par poulies et courroies) et non par paliers successifs comme dans le cas d'une boîte de vitesse.

Cx (Coefficient aérodynamique) :

Coefficient situé entre 0 et 1, caractérisant la qualité de pénétration dans l'air du véhicule donc le profil de la carrosserie (la diminution du Cx améliore la consommation du véhicule).

Cycle ou réalisation d'un parcours :

Profils de vitesse véhicule et de pente de la route, en fonction du temps, utilisé pour déterminer la consommation d'un véhicule.

DIESTER :

Carburant renouvelable réalisé à partir d'huile végétale, le colza. Il est associé au gazole pour diminuer les émissions polluantes.

DOD (Depth of Discharge) :

Profondeur de décharge, c'est-à-dire quantité d'énergie puisée dans la batterie exprimée en pourcentage de la capacité maximale (DOD=1-SOC).

Freinage récupératif :

Capacité à récupérer dans la batterie l'énergie cinétique du véhicule lors d'une décélération.

Générateur électrique :

Association d'un moteur thermique (moteur essence ou diesel) avec un alternateur.

GMP (Groupe Moto-Propulseur) :

Ensemble des éléments mécaniques permettant la traction du véhicule (moteur, boîte de vitesse, embrayage...).

GNV (Gaz Naturel pour Véhicules) :

Hydrocarbure qui ne dégage ni fumées, ni particules et qui diminue fortement les émissions de CO et d'oxydes d'azote. De plus, sa combustion réduit les vibrations et donc le bruit.

GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié) :

Mélange composé de butane et de propane qui permet de réduire les rejets d'oxydes d'azote et de particules par rapport à un véhicule diesel. De plus, le GPL réduit la nuisance sonore.

GSM (Global System for Mobile Communications) :

Ce système de positionnement américain repose sur 24 satellites en orbites quasi circulaires. La connaissance de la position de 4 de ces satellites permet le calcul de la longitude, de la latitude et de l'altitude du récepteur. Ce service dépendant entièrement de la bonne volonté du gouvernement américain, un nouveau système de localisation GNSS (Global Navigation Satellite System) est en cours de définition.

HYZEM (Hybrid technology approaching efficient Zero Emission Mobility) :

Programme européen sur les technologies automobiles hybrides pour satisfaire une mobilité à faible consommation d'énergie et émissions de polluants. Ce programme européen s'est traduit en particulier par une bibliothèque de composants HYZEM-LIB permettant la simulation sous MATLAB/SIMULINK de véhicules hybrides

Jerk :

Dérivée de l'accélération.

LEV (Low Emission Vehicle) :

Véhicule à faibles émissions polluantes.

PNVG (Partnership for a New Generation of Vehicles) :

Partenariat (1993-2001) entre le gouvernement américain (par l'intermédiaire des laboratoires fédéraux) et les trois principaux constructeurs Daimler-Chrysler, Ford et General Motors pour développer de nouvelles technologies à faibles émissions polluantes et conservant le confort, les performances et la sécurité des véhicules actuels.

SAE (Système d'Aide à l'Exploitation) :

Liaison entre le bus et la société exploitante permettant de connaître l'état du bus vis à vis de son horaire.

SOC (State of Charge) :

Etat de charge, c'est-à-dire quantité d'énergie restant dans le système de stockage (comme la batterie) exprimée en pourcentage de la capacité maximale.

Transmission :

Succession d'organes permettant de communiquer aux roues les forces de propulsion créées à partir de la ou les sources d'énergie.

Transmission infiniment variable :

Voir CVT.

VPAC (Véhicule à Pile à Combustible) :

Véhicule électrique, dont l'énergie est produite par la combustion d'hydrogène et d'oxygène. Si la pile est alimentée directement par de l'hydrogène, le dispositif est alors totalement propre, puisqu'il ne dégage que de la vapeur d'eau. L'hydrogène peut également être produit à bord du véhicule à l'aide d'un reformer, alimenté en hydrocarbure : le dispositif est alors utilisé pour le rendement avantageux de la pile à combustible vis à vis de celui du moteur thermique. Trois constructeurs, Mercedes, MAN et Irisbus proposent des véhicules de transport en commun à pile à combustible. En ce qui concerne les véhicules particuliers, Daimler-Crysler, General Motors et Toyota annoncent leur premier véhicule à pile à combustible pour 2003-2005. Associé à une batterie, le véhicule à pile à combustible peut être classé dans les véhicules hybrides.

ZEV (Zero Emission Vehicle) :

Véhicule qui ne produit aucune émission polluante (le véhicule électrique par exemple).

NOTATIONS.

NOTATIONS.

Les principales notations utilisées sont :

V_{veh} ,	vitesse du véhicule
A_{veh} ,	accélération du véhicule
M_{veh} ,	masse du véhicule
C_{MT} ,	couple fourni par le moteur thermique
N_{MT} ,	régime du moteur thermique
C_{alt} ,	couple fourni par l'alternateur
N_{alt} ,	régime de l'alternateur
ρ_{alt} ,	rendement moyen de l'alternateur
P_g ,	puissance fournie par le générateur électrique (association du moteur thermique et de la batterie)
P_{gmax} ,	puissance maximale pouvant être fournie par le générateur électrique
C ,	consommation instantanée du générateur électrique
S ,	consommation spécifique du générateur électrique
P_{aux} ,	puissance consommée par les auxiliaires
P_{dem} ,	puissance électrique demandée totale (puissance demandée par les moteurs électriques pour la traction et puissance consommée par les auxiliaires)
U ,	tension de la batterie
I ,	courant débité par la batterie
E ,	tension à vide de la batterie
R ,	résistance interne de la batterie
$Nb_{série}$,	nombre de cellules en série
$Nb_{parallèle}$,	nombre de cellules en parallèle
E_0 ,	tension à vide d'une cellule
R_0 ,	résistance interne d'une cellule
Q_{max} ,	capacité maximale d'un module
SOC ,	état de charge de la batterie
W ,	énergie disponible dans la batterie
P ,	puissance fournie par la batterie
$P_{rechmax}$,	puissance maximale de recharge de la batterie
$P_{déchmax}$,	puissance maximale de décharge de la batterie
$\rho_{decharge}$,	rendement moyen de décharge de la batterie
$\rho_{recharge}$,	rendement moyen de recharge de la batterie

NOTATIONS.

INTRODUCTION GENERALE.

Depuis plusieurs années, les fluctuations du prix du pétrole, sa possible raréfaction et les méfaits des gaz néfastes à l'environnement ont déclenché une partie des récentes études sur notre système de transport. Cette prise de conscience collective a entraîné des réglementations toujours plus strictes sur les émissions polluantes et la consommation des véhicules, qui sont ainsi devenues deux critères primordiaux pour la conception de nouveaux véhicules. L'amélioration du rendement du moteur thermique, la réduction des émissions par post-traitement, l'optimisation des stratégies de commande désormais numériques, ont permis d'importants progrès, mais atteignent aujourd'hui leurs limites. Pour répondre au défi d'une réduction encore accrue des consommations et émissions, l'industrie automobile s'est tout d'abord tournée vers les véhicules électriques qui éliminent la combustion à leur bord et ainsi ne produisent plus d'émissions polluantes. Par contre, leur principal handicap réside dans la batterie encore très lourde et très coûteuse. L'intérêt des consommateurs pour ce type de véhicules dépend donc des progrès technologiques qui vont être réalisés dans les années à venir. Aujourd'hui, l'autonomie des véhicules électriques dépend fortement du style de conduite utilisé. Même un conducteur économe ne peut espérer atteindre que 200 km d'autonomie pour une durée de recharge très longue (de 6 à 8 heures). De plus, les véhicules électriques nécessitent l'installation d'infrastructures spécifiques pour la recharge de la batterie aussi bien dans les garages des particuliers que dans des stations publiques pour permettre les longs trajets. C'est pourquoi, de nouvelles technologies sont à l'étude, en particulier les véhicules électriques hybrides.

Un véhicule hybride combine un système électrique (un ou plusieurs moteurs électriques et une batterie) avec un moteur à combustion interne pour utiliser les avantages de chaque organe et ainsi, améliorer le rendement de la transmission. La batterie peut être rechargée à bord du véhicule, ce qui évite l'installation coûteuse de nouvelles infrastructures : l'autonomie du véhicule ne dépend alors plus que de la capacité de son réservoir comme dans un véhicule conventionnel. Cependant, ce type de véhicule, disposant de deux sources d'énergie distinctes, pose de nouveaux problèmes de répartition de la puissance demandée aux roues entre les sources disponibles. Ces stratégies de répartition sont communément appelées lois de gestion d'énergie et font l'objet de nombreux travaux d'optimisation. Deux approches sont communément distinguées suivant que l'on :

- ☞ optimise des lois issues de la connaissance d'experts : on parle alors de commande optimisée en-ligne,
- ☞ recherche la meilleure stratégie possible pour un profil de mission donné (commande optimisée hors-ligne).

Le travail présenté dans ce mémoire se situe dans la seconde catégorie, correspondant à l'optimisation hors-ligne : il s'agit de développer des lois de gestion d'énergie embarquables dans un véhicule hybride et prenant en compte le parcours suivi. Nous souhaitons disposer de lois de gestion d'énergie susceptibles d'être embarquées dans un véhicule, autrement dit nous désirons pouvoir appliquer les résultats obtenus sur un système réel : nous nous placerons donc, également, dans le cadre des commandes en-ligne.

La problématique ainsi définie implique un certain nombre de contraintes rarement évoquées. En effet, nous devons porter une attention particulière aux calculs nécessaires à l'obtention des résultats des lois de gestion d'énergie, puisqu'un calculateur de véhicule n'a rien de comparable en termes de capacité mémoire et puissance de calcul avec un PC de calcul utilisé en simulation. De plus, nos objectifs seront tournés vers la lisibilité des résultats, c'est-à-dire vers une formulation sous forme de règles relativement simples, pour rendre leur implantation dans un véhicule plus aisée. Concrètement, ces remarques se traduiront par la décomposition du problème général en sous-problèmes plus faciles à résoudre puis l'association, ensuite, des blocs de commande obtenus.

Ce mémoire de thèse s'organise en cinq chapitres.

Le premier chapitre, « Présentation des Véhicules Electriques Hybrides », décrit le fonctionnement des véhicules hybrides en présentant les trois principales classifications classiquement effectuées : l'architecture du système de propulsion (véhicule hybride de type série, parallèle,...), les modes de fonctionnement (mode ZEV, mode hybride, freinage récupératif) et le dimensionnement des composants (véhicule électrique avec prolongateur d'autonomie, véhicule thermique assisté électriquement). Ensuite, il détaille l'objectif des lois de gestion d'énergie et réalise leur état de l'art.

Dans le deuxième chapitre, « Le Bus Hybride et son Modèle de simulation », le sujet d'application de la thèse est précisé : il s'agit d'un modèle Matlab/Simulink représentant un bus de type hybride série.

Le chapitre suivant, « Optimisation des Lois de Gestion d'Energie », présente les trois étapes de développement de lois de commande optimisant la consommation à partir de l'application du principe du maximum de Pontryaguine : la formalisation du problème, sa résolution et le passage de cette conception hors-ligne à une commande embarquée.

Le chapitre IV, « Adaptation des Lois de Gestion d'Energie au Parcours Effectué », propose une méthodologie pour adapter les lois de gestion d'énergie au parcours effectué. Pour cela, le problème a été décomposé en trois niveaux distincts. Le niveau instantané est constitué de lois de gestion d'énergie instantanées issues des travaux décrits dans le chapitre précédent. Le niveau d'apprentissage détermine un profil d'état de charge de la batterie à suivre à partir de la connaissance a priori du parcours. Il évalue ensuite la reproductibilité de la réalisation pour éventuellement intégrer les nouvelles connaissances acquises. Enfin, le niveau intermédiaire de supervision locale réalise le lien entre les deux autres niveaux en modifiant les lois de gestion d'énergie instantanée pour permettre à la batterie de suivre un profil d'état de charge désiré.

Le dernier chapitre de ce mémoire, « Validation des Résultats », compare les différentes lois de gestion d'énergie développées à partir du modèle de simulation de bus hybride. Les résultats sont obtenus pour un ensemble de données issues d'une base d'essais réalisée sur un bus en situation normale de fonctionnement.

Chapitre I - PRESENTATION DES VEHICULES ELECTRIQUES HYBRIDES.

Un véhicule hybride est un véhicule disposant d'au moins deux sources d'énergie, typiquement un réservoir de carburant et une batterie, associés à des machines de conversion de l'énergie, telles que les moteurs électriques et les moteurs à combustion interne.

Dans un premier temps, ce chapitre détaille le fonctionnement du véhicule hybride à partir de plusieurs classifications classiquement effectuées. Le véhicule hybride peut, en effet, être vu au travers de l'architecture de son système de propulsion, s'articulant autour de deux organisations élémentaires : l'architecture série et l'architecture parallèle. Il peut également être défini à partir de ses modes de fonctionnement utilisant une ou plusieurs sources d'énergie ou encore, à partir du dimensionnement relatif de ses deux sources d'énergie proches du véhicule électrique ou au contraire du véhicule conventionnel.

Les lois de gestion d'énergie sont, ensuite, présentées et situées plus généralement dans le cadre de la commande du véhicule hybride. L'historique de leur développement permet de dégager les tendances actuelles et positionne les travaux effectués dans le cadre de cette thèse.

Un véhicule hybride est un véhicule qui combine au moins deux sources d'énergie différentes, le plus souvent un réservoir de carburant et une batterie, associées à des machines de conversion d'énergie telles que les moteurs à combustion interne et les moteurs électriques. Le traditionnel moteur thermique peut aussi être remplacé par une turbine à gaz ou une pile à combustible... et différents moyens de stockage de l'énergie électrique [Koeneman-P., McAdams-D., 1998] (batteries, super-capacités, volants d'inertie électrique...) sont également envisageables. Dans ce mémoire de thèse, nous ne considérerons que le cas où le véhicule comporte un moteur à combustion interne (essence ou diesel) et une batterie. La méthodologie reste cependant transposable aux autres types d'hybrides.

Ce premier chapitre commence par une présentation et une classification des véhicules hybrides en utilisant les différents critères proposés dans [Maggetto-G, Van-Mierlo-J, 2000] :

- ∞ suivant l'architecture du véhicule autrement dit le type d'association des différents composants,
- ∞ suivant le dimensionnement des deux sources d'énergie,
- ∞ suivant, enfin, les modes de fonctionnement possibles (fonctionnement électrique, thermique, hybride).

Il se poursuivra par une présentation générale des lois de gestion d'énergie et de leur historique pour permettre de les replacer dans la commande globale des véhicules hybrides. Finalement, ce chapitre se terminera par la présentation des objectifs de cette thèse.

1 - Hybride série ou hybride parallèle ?

De nombreuses architectures de véhicules hybrides sont concevables. Elles s'organisent cependant autour de deux configurations principales du système de propulsion ([Jalil-N, Kheir-N, Salman-M, 1997]), l'organisation série et l'organisation parallèle. Mais avant de décrire plus précisément les associations classiques des composants dans un véhicule hybride, revenons rapidement sur les spécificités du véhicule électrique et du véhicule thermique conventionnel.

1.1 - Le véhicule électrique et le véhicule thermique conventionnel.

Le véhicule conventionnel est schématiquement composé des trois éléments suivants (Figure I.1) : le réservoir, le moteur thermique et la transmission. La transmission a pour objectif de fournir aux roues motrices les forces de propulsion. Pour cela, l'embrayage permet à la fois le démarrage du véhicule et l'interruption du transfert de force entre le moteur et les roues lors du passage des vitesses. Cette boîte de vitesse est nécessaire pour adapter le couple du moteur au besoin de puissance aux roues. Dans ces conditions, la

consommation du moteur thermique, dépendant du couple et du régime fournis, ne peut être optimisée qu'à partir du choix de la longueur des rapports de la boîte de vitesse.

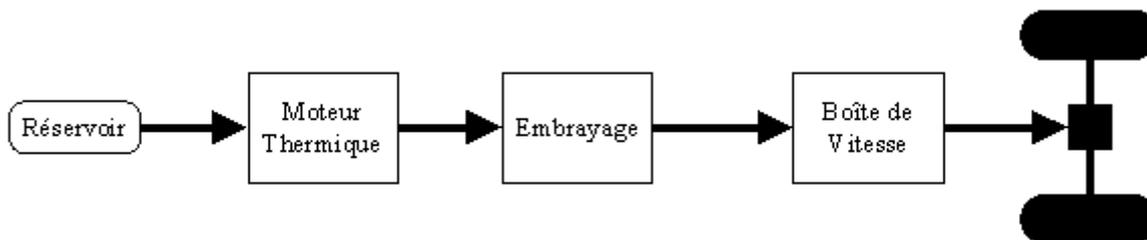


Figure I.1 – Principe du véhicule thermique conventionnel.

Dans un véhicule électrique tel que celui de la Figure I.2, l'énergie de traction est stockée dans un accumulateur ou batterie et est transformée en mouvement par le moteur électrique. En comparaison avec le moteur à combustion interne, cette structure dispose de nombreux avantages : faible bruit, aucune émission polluante, faible coût énergétique... Par contre, les batteries représentent le point faible du dispositif : faible stockage d'énergie vis-à-vis d'un réservoir de carburant, coût élevé, poids important et durée de vie limitée.

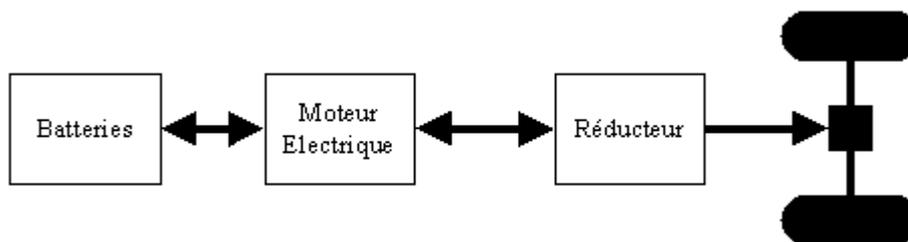


Figure I.2 – Principe du véhicule électrique.

Les véhicules hybrides vont donc essayer de combiner ces deux structures pour à la fois améliorer le rendement du moteur thermique du véhicule conventionnel et limiter la taille de la batterie du véhicule électrique.

1.2 - L'hybride série.

L'hybride série est composé d'une propulsion intégralement électrique assurée par un ou plusieurs moteurs. En ville, la batterie permet de rouler en mode purement électrique sur des trajets courts. Sur route, un moteur thermique entraîne un alternateur pour assurer la recharge de la batterie et l'alimentation de la motorisation électrique. La batterie stocke l'énergie issue de la conversion du carburant en énergie électrique, quand la puissance demandée aux roues est inférieure à la puissance fournie par le générateur électrique (association moteur thermique – alternateur) et fournit de la

puissance dans le cas contraire. Ces transferts d'énergie (Figure I.3) ont pour but d'améliorer le rendement du générateur électrique.

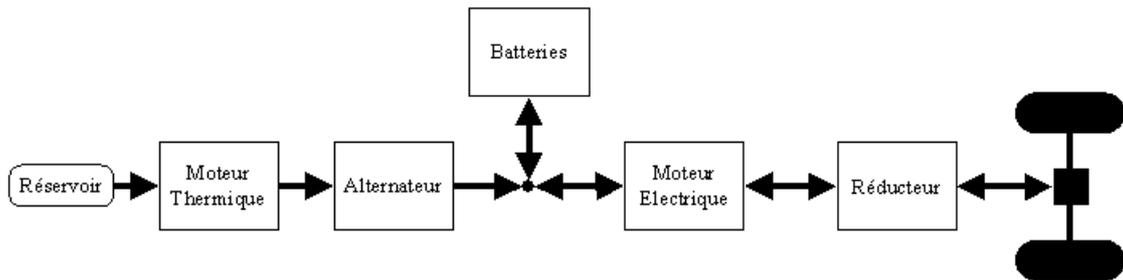


Figure I.3 - Principe de l'architecture série.

Dans cette architecture, le moteur thermique n'est pas lié directement aux roues, ce qui constitue son principal avantage. En effet, pour fournir une certaine puissance aux roues, il existe maintenant deux degrés de liberté pour optimiser la consommation du moteur. D'une part, il est possible de choisir la part de la puissance qui sera fournie par le moteur thermique et celle qui sera issue de la batterie. D'autre part, il est possible de définir la répartition entre couple et régime de la puissance obtenue à l'aide du moteur thermique¹. Par contre, l'énergie provenant du réservoir passe à travers le moteur thermique et deux machines électriques avant d'atteindre les roues. La succession des conversions énergétiques implique un rendement total relativement faible.

Dans cette architecture, les performances du véhicule vont être fixées par les composants électriques (la batterie et les deux machines électriques) et non par la dynamique du moteur thermique.

1.3 - L'hybride parallèle.

L'hybride parallèle conserve un lien mécanique entre le moteur thermique et les roues. Il est composé d'une double propulsion thermique et électrique (Figure I.4), c'est-à-dire que les deux sources d'énergie sont susceptibles de fournir directement la puissance motrice.

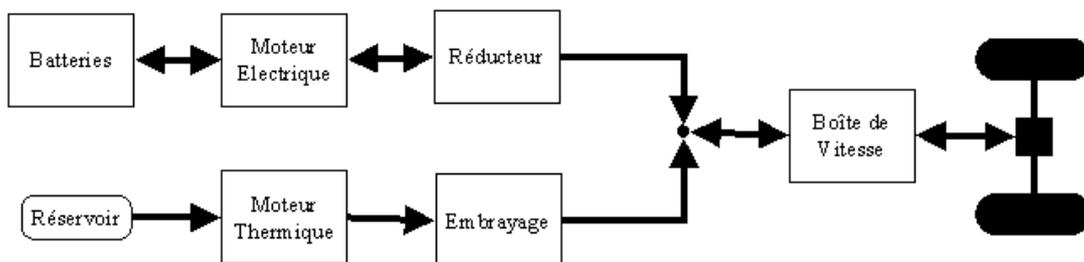


Figure I.4 – Principe de l'architecture parallèle.

¹ Cette répartition entre le couple et le régime fournis définit la consommation du moteur thermique et fera l'objet d'un développement plus complet dans le chapitre suivant.

Cette architecture permet de limiter le nombre de composants supplémentaires à installer. En contrepartie, le système est complexe mécaniquement puisque plusieurs composants sont liés aux roues. Le système perd également un degré de liberté puisque le régime du moteur thermique est imposé par la vitesse du véhicule. Plus précisément, pour fournir une certaine puissance aux roues, il est seulement possible de choisir la répartition du couple entre le moteur thermique et la batterie². Le moteur thermique est donc susceptible de fonctionner sur une plus large bande de vitesse.

1.4 - La combinaison des deux.

D'autres architectures combinant les motorisations thermiques et électriques peuvent aussi être envisagées pour associer sur un même véhicule les fonctionnements en hybride série et en hybride parallèle, par exemple en utilisant un train épicycloïdal (Figure I.5). En multipliant les flux d'énergie possibles, ces architectures offrent un plus grand potentiel de gain en consommation. Par contre, elles multiplient également le nombre de composants et complexifient leurs liens.

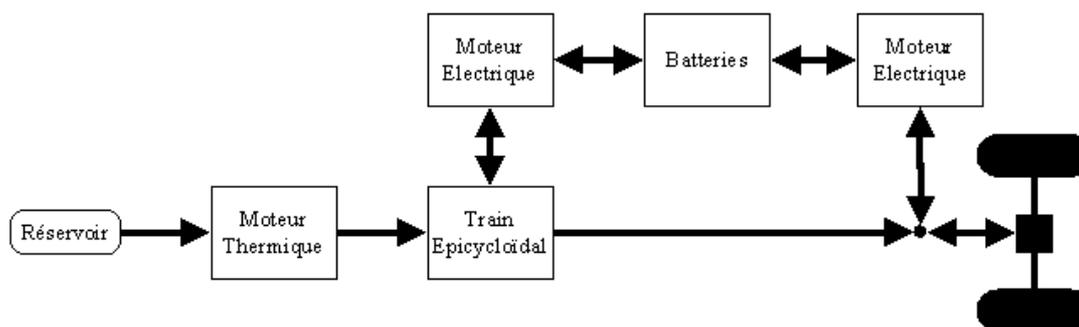


Figure I.5 - Principe de l'architecture à dérivation de puissance.

Cette description des véhicules hybrides à partir de l'étude de l'organisation des organes permet également de définir des modes de fonctionnement. Selon ce nouveau critère, il est possible de distinguer deux grandes catégories : le fonctionnement nécessitant une seule source d'énergie et le fonctionnement dit hybride, utilisant simultanément les deux sources.

2 - Les modes de fonctionnement.

Un véhicule hybride dispose d'au moins deux sources d'énergie dont l'une est une source réversible. Il est donc susceptible de disposer de plusieurs modes de fonctionnement utilisant une seule source d'énergie ou les

² Des études sur l'hybride parallèle cherchent à augmenter le nombre de degré de liberté en remplaçant la boîte de vitesse par une CVT (Continuously Variable Transmission).

deux simultanément. De plus, comme dans le cas du véhicule électrique, le véhicule hybride dispose de la faculté de récupérer dans sa batterie une partie de l'énergie de décélération.

2.1 - Les modes de fonctionnement à une seule source d'énergie.

Le véhicule hybride, utilisant uniquement sa batterie pour assurer sa traction, se comporte comme un véhicule électrique. On parle alors de traction électrique ou mode ZEV puisqu'il ne se produit aucune émission polluante. Le moteur thermique peut également, dans certaines conditions, assurer seul la traction du véhicule, ce qui constitue le second mode à une seule source d'énergie.

2.2 - Les modes de fonctionnement hybrides.

Dans un véhicule hybride, les deux sources d'énergie peuvent également fonctionner simultanément. Le moteur thermique peut assurer à la fois la traction du véhicule et la recharge de la batterie lorsqu'il fournit plus de puissance que celle demandée aux roues. On parle alors du mode recharge.

Dans le cas de fortes demandes (accélérations), pour augmenter les performances du véhicule, il est également possible de solliciter les deux sources d'énergie pour fournir la puissance motrice. C'est le phénomène dit de boost électrique.

2.3 - Le freinage récupératif.

Le freinage récupératif, comme décrit dans [Gao-Y, Chen-L, Ehsani-M., 1999], consiste à utiliser une partie de l'énergie de décélération du véhicule (énergie cinétique et énergie potentielle) pour recharger la batterie. En effet, un bilan des forces appliquées sur le véhicule fournit l'équation ci-dessous :

$$M_{veh} \cdot \frac{dV_{veh}}{dt} = F_{trac} - F_{frein} - F_{resist} \quad \text{équation I.1}$$

où M_{veh} représente la masse du véhicule,

V_{veh} , sa vitesse,

F_{trac} est la force de traction fournie par les sources d'énergie,

F_{frein} , celle provenant du freinage,

F_{resist} constitue l'ensemble des forces de résistance à l'avancement :

$$F_{resist} = F_{pente} + F_{aero} + F_{roul} + F_{trainée} \quad \text{équation I.2}$$

F_{pente} caractérise le franchissement de rampe (pente α) :

$$F_{pente} = M_{veh} \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad \text{équation I.3}$$

F_{aero} est la résistance aérodynamique dépendant de la densité de l'air ρ_{air} , du coefficient aérodynamique Cx , de l'aire frontale du véhicule Af_{veh} et de la vitesse véhicule. Dans cette équation, la vitesse du vent n'est pas prise en compte :

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot Scx \cdot V_{veh}^2 \text{ avec } Scx = Cx \cdot Af_{veh} \quad \text{équation I.4}$$

F_{roul} est la force de résistance au roulement liée aux pneumatiques et à la masse du véhicule :

$$F_{roul} = C_{roul} \cdot M_{veh} \cdot g \quad \text{équation I.5}$$

$F_{trainée}$ caractérise le reste des forces de frottements supposées constantes :

$$F_{trainée} = \text{constante} \quad \text{équation I.6}$$

Lorsque le conducteur souhaite freiner son véhicule ($F_{trac} = 0$), l'équation I.1 devient :

$$F_{frein} = -M_{veh} \cdot \frac{dV_{veh}}{dt} - M_{veh} \cdot g \cdot \sin(\alpha) - F_{aero} - F_{roul} - F_{trainée} \quad \text{équation I.7}$$

Dans un véhicule conventionnel, cette énergie est dissipée sous forme de chaleur dans les freins. Dans un véhicule hybride comme dans un véhicule électrique, le moteur électrique de traction est réversible et fonctionne en générateur pour transformer une partie de cette énergie en électricité stockée dans la batterie.

La prépondérance ou non d'un mode de fonctionnement dépend principalement du dimensionnement des organes. Le dimensionnement peut ainsi devenir un autre critère de classification des véhicules hybrides.

3 - Principaux types de véhicules hybrides.

Comme le montre la Figure I.6, trois types de véhicules électriques hybrides sont communément identifiés suivant le poids relatif des deux sources d'énergie : le véhicule électrique avec prolongateur d'autonomie, le véhicule thermique assisté électriquement et le véhicule hybride proprement dit.

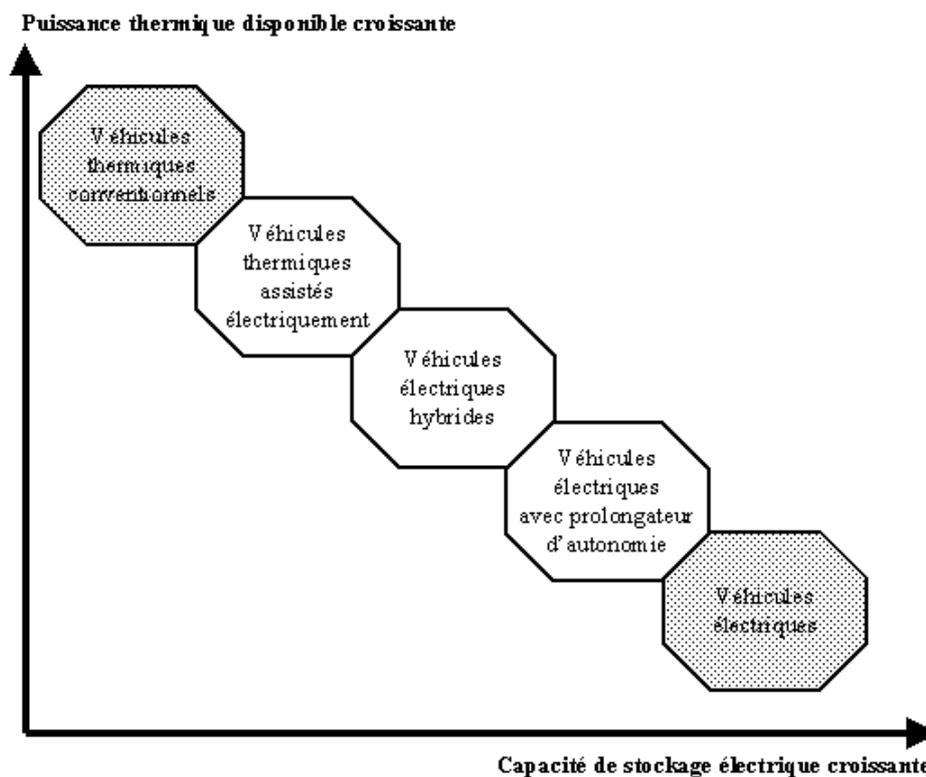


Figure 1.6 – Spectre des différents types d'hybrides.

3.1 - Le véhicule électrique avec prolongateur d'autonomie.

Le véhicule électrique avec prolongateur d'autonomie ou range extender, est un hybride de type série, avec une utilisation très proche du véhicule électrique. Il s'en distingue par une capacité à rouler hors des plages d'autonomie de la batterie. Pour cela, il est équipé avec une batterie de grande taille et un petit moteur thermique. Suivant l'option choisie, le moteur thermique peut fournir la puissance permettant au véhicule de continuer à fonctionner lorsque la batterie est déchargée, mais avec un niveau de puissance maximale réduit : le véhicule est alors majoritairement utilisé comme un véhicule électrique. Une autre solution consiste à fournir la puissance moyenne nécessaire au fonctionnement du véhicule par le moteur thermique et le complément par rapport à la puissance demandée par la batterie. Le fonctionnement du véhicule dans ce cas est majoritairement effectué en mode hybride.

3.2 - Le véhicule thermique assisté électriquement.

Situé à l'autre bout du spectre des hybrides et très proche du véhicule conventionnel, le véhicule thermique assisté électriquement ou power assist utilise un système de propulsion électrique en plus du moteur thermique pour diminuer les émissions et la consommation de carburant ; c'est un hybride de

type parallèle. Le moteur thermique doit dans ce cas être capable de fournir la puissance moyenne nécessaire au véhicule pour fonctionner dans toutes les conditions de circulation.

3.3 - Le véhicule électrique hybride proprement dit.

Le véhicule électrique hybride désignera par la suite un véhicule possédant deux sources d'énergie d'égale importance. Cet hybride a donc la capacité de rouler uniquement en électrique grâce à une batterie permettant de parcourir une distance en tout électrique significative et possède un moteur thermique suffisamment important pour fournir la puissance nécessaire à toutes les conditions de circulation. C'est l'hybride le plus flexible puisqu'il peut opérer comme un véhicule électrique (avec éventuellement une recharge de la batterie la nuit) et peut aussi être utilisé pour de longs trajets sans la limitation d'autonomie de la batterie.

Après cette description des véhicules hybrides suivant trois critères, architecture, modes de fonctionnement et dimensionnement, regardons les catégories de véhicule hybride étudiées à la Direction de la Recherche de Renault.

4 - Historique des véhicules hybrides Renault.

Depuis le début des années 1990, Renault étudie les technologies hybrides aussi bien de type série que parallèle. Suivant les projets, les sources d'énergie sont variées : turbine à gaz, pile à combustible et, bien sûr, moteur thermique traditionnel.

4.1 - La première voiture hybride Renault : NEXT.

Le véhicule NEXT, présenté en 1995, est une voiture familiale disposant de deux types de propulsion. Deux petits moteurs de 7 kW, alimentés par 150 kg de batterie nickel-cadmium, sont situés dans les roues arrières et un petit moteur essence de 35 kW à l'avant. Le véhicule peut donc disposer de quatre roues motrices. Le superviseur gère à la fois le pilotage des moteurs électriques et thermique, de la boîte de vitesse et de l'embrayage. La gestion d'énergie utilisée est très simple puisque le véhicule fonctionne uniquement en électrique pour les faibles vitesses et uniquement en thermique pour les vitesses intermédiaires. A haute vitesse, tous les moteurs propulsent le véhicule. Une originalité de ce véhicule réside dans le fait que la recharge de la batterie ne peut s'effectuer qu'au travers de la route, puisque aucune autre liaison avec le moteur thermique n'existe.

4.2 - Le programme VERT.

Commencé en 1991 et achevé en 2000, le programme VERT, Véhicule Electrique Routier à Turbine, consistait à étudier l'architecture série des véhicules hybrides à partir d'un alternateur couplé à une turbine à gaz. Il a été réalisé en trois étapes :

- ∞ étudier la faisabilité technique en réalisant un prototype avec des composants disponibles sur le marché,
- ∞ intégrer la technologie dans un véhicule routier en respectant ses prestations,
- ∞ étudier la faisabilité technico-économique.

Conçu sur la base d'un espace (Figure I.7), le programme a permis la réalisation de deux véhicules prototypes : le véhicule probatoire pour valider les concepts et affiner le cahier des charges et le véhicule de démonstration.

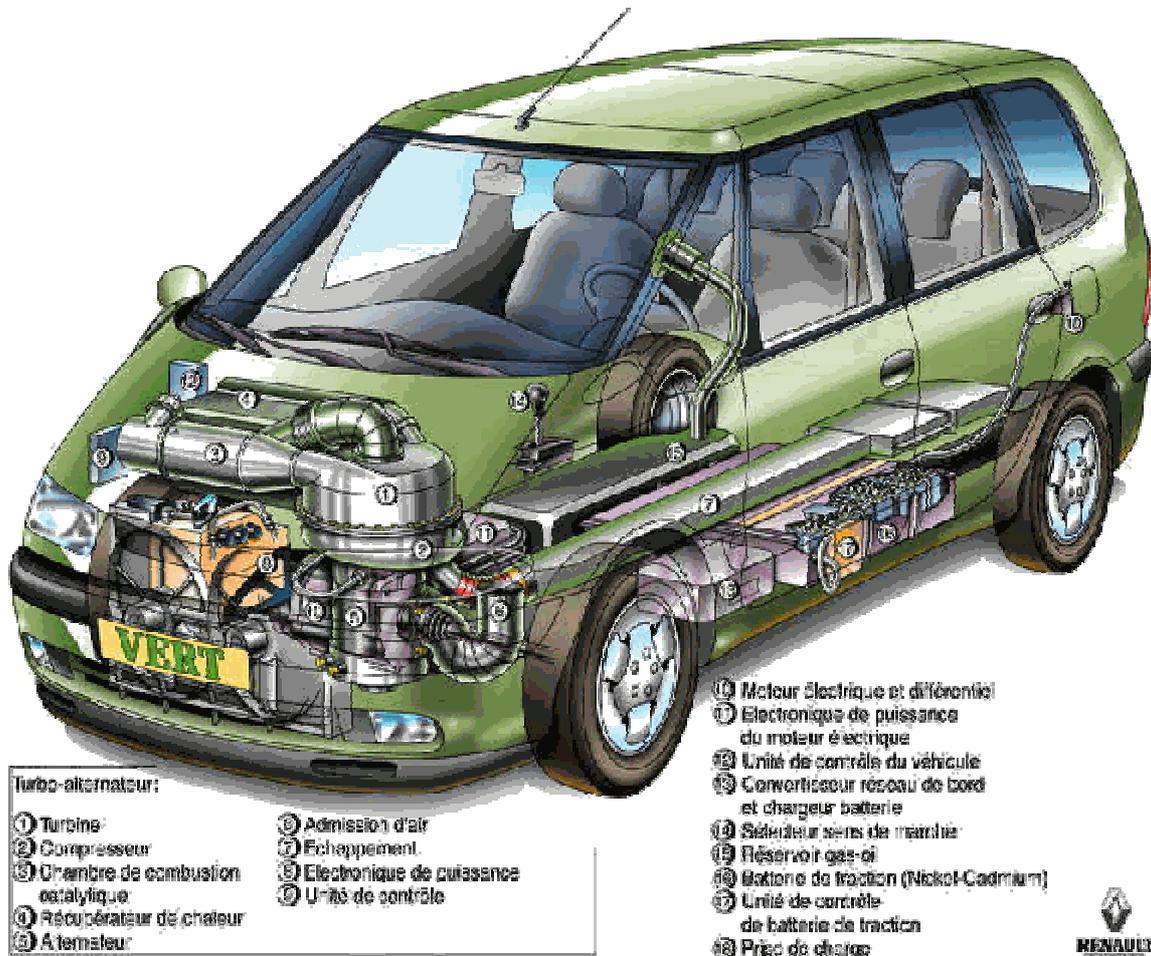


Figure I.7 – Le prototype VERT.

4.3 - Le projet HYMNE.

Le projet HYMNE, Hybride à Moteurs Normal et Electrique, a permis d'étudier la faisabilité technique d'un véhicule hybride de type parallèle et a vu la réalisation de quatre prototypes sur base Express (juin 1996 et novembre 1997), Kangoo (février 1998) puis Scénic (septembre 1998).

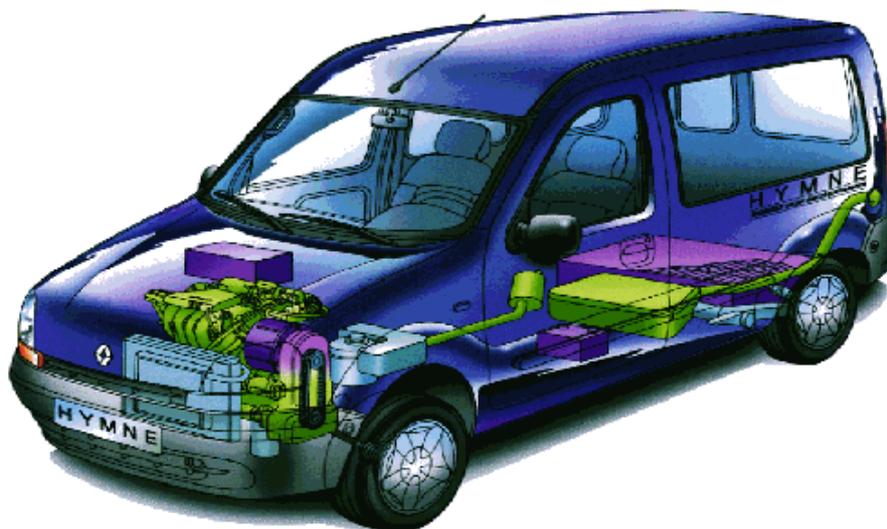


Figure I.8 – Le prototype 3 du projet HYMNE.

Le dernier véhicule (Figure I.9) développé allie un moteur thermique de 85 kW avec un moteur électrique de 30 kW et 140kg de batterie nickel-cadmium. Un sélecteur de mode permet de choisir un roulage électrique (de 20 à 25km d'autonomie) ou un roulage hybride. Dans ce dernier cas, un superviseur pilote les moteurs et la boîte de vitesse robotisée.

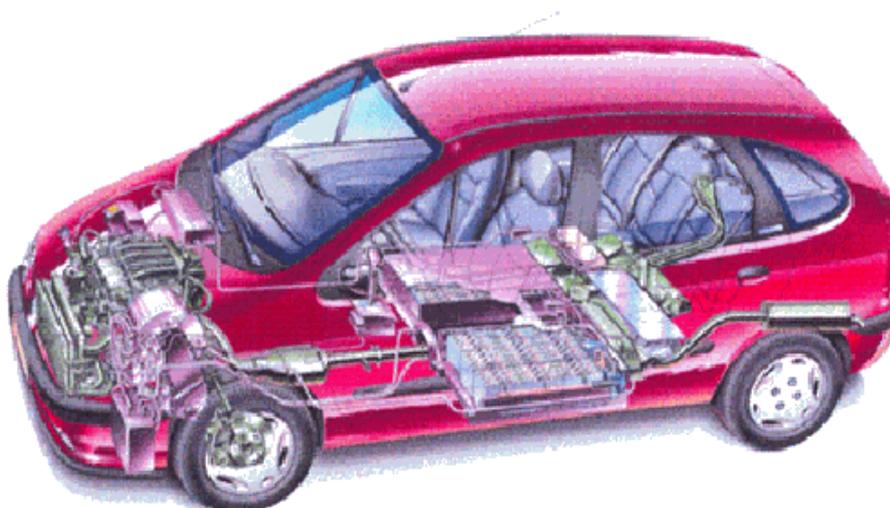


Figure I.9 – Le dernier prototype du projet HYMNE.

4.4 - Le projet FEVER.

Le projet européen FEVER, Fuel Cell Electric Vehicle for Efficiency and Range, a permis la réalisation par Renault d'un véhicule à pile à combustible sur la base d'une Laguna Nevada. Ce véhicule est alimenté directement en hydrogène stocké sous forme liquide, ce qui le rend totalement propre (rejet d'eau uniquement).

Dans tous ces programmes de recherche, un besoin commun peut rapidement être mis en évidence : comment utiliser au mieux les sources d'énergie disponibles. Ce constat fait l'objet d'une recherche spécifique regroupée sous le terme de lois de gestion d'énergie. Les paragraphes suivants vont permettre de définir plus clairement les différentes stratégies envisageables.

5 - Les lois de gestion d'énergie.

Dans un véhicule conventionnel, l'enfoncement de la pédale d'accélération traduit en puissance demandée suffit à gérer complètement le véhicule. Pour un véhicule hybride, le problème est beaucoup plus complexe : sachant qu'une certaine puissance aux roues doit être fournie, il faut encore trouver comment répartir cette demande entre les deux sources d'énergie. Ces stratégies sont regroupées sous le terme « lois de gestion d'énergie ».

5.1 - Principe de la commande d'un véhicule hybride.

La commande d'un véhicule hybride connue sous le terme de superviseur ou UCVH (Unité de Contrôle de Véhicule Hybride) est en relation avec tous les organes de la chaîne de traction (batterie, moteur thermique, moteurs électriques,...). Elle nécessite la connaissance de l'état précis du véhicule : vitesse du véhicule, température des composants, état de charge de la batterie... et peut être décomposée en plusieurs niveaux comme le montre la Figure I.10 :

∞ l'interface entre le conducteur et le véhicule qui consiste à traduire la demande du conducteur (la position des pédales d'accélérateur et de frein) en terme de puissance demandée,

∞ la gestion des flux d'énergie dans le véhicule hybride autrement dit l'application d'algorithmes (lois de gestion d'énergie) déterminant quand arrêter ou démarrer les moteurs et calculant ensuite la répartition de la demande entre les différentes sources,

☞ la consigne des asservissements locaux des organes³ (couple du moteur thermique, des machines électriques, éventuellement rapport de la boîte de vitesse,...) garantissant à la fois la sécurité du véhicule et de ses occupants et la fiabilité de la chaîne de traction.

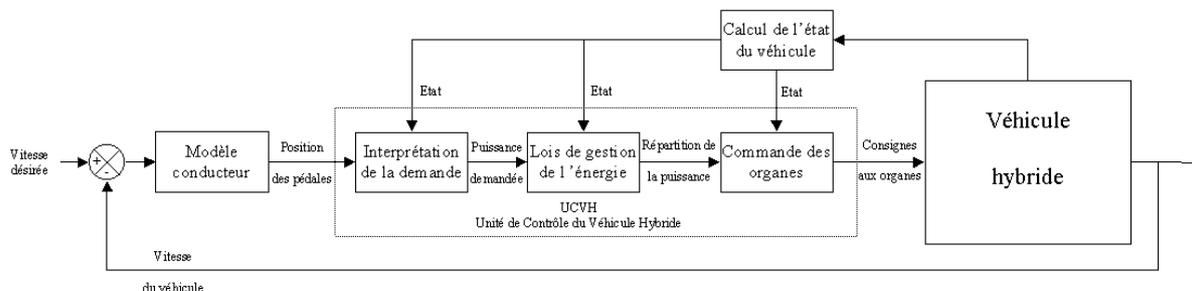


Figure I.10 – Schéma général de la commande d'un véhicule électrique hybride.

Les lois de gestion d'énergie représentent la partie supervision de la commande. Il s'agit de déterminer la manière de produire, stocker et consommer l'énergie afin d'apporter satisfaction au conducteur tout en optimisation la consommation de carburant. Dans un véhicule thermique classique, la gestion de l'énergie n'offre que peu de possibilité d'optimisation. Il n'existe qu'une source d'énergie principale, l'élément de stockage électrochimique étant de capacité très limitée. A une demande d'énergie donnée du moteur thermique, il est donc relativement facile de déterminer le point de fonctionnement de la chaîne de traction permettant d'obtenir cette énergie au moindre coût. Avec l'arrivée des véhicules hybrides disposant de plusieurs sources d'énergie et d'un ou plusieurs éléments de stockage temporaires conséquents, la gestion de l'énergie devient un problème beaucoup plus complexe.

5.2 - Présentation générale des lois de gestion d'énergie.

La possibilité de disposer ou non d'une recharge en électricité extérieure au véhicule est un facteur fondamental dans la détermination des lois de gestion d'énergie ([Duoba-M, Larsen-R, LeBlanc-N, 1996]). En effet, en supposant une recharge de la batterie la nuit, les lois de gestion d'énergie vont chercher à atteindre, à la fin de la journée, un niveau de décharge maximum pour utiliser de préférence la traction électrique. Au cours de la journée, il faut cependant maintenir un niveau suffisant d'état de charge pour garantir les performances du véhicule.

Dans le cas étudié ici, le véhicule ne dispose pas d'une possibilité de recharge extérieure de la batterie qui est donc rechargée uniquement à bord

³ Un module de commande permettant d'assurer que les organes fournissent correctement les consignes désirées peut en plus être intégré. Cette partie de cette commande à dynamique rapide ne sera jamais considérée.

du véhicule. Dans ce cas, les lois de gestion d'énergie cherchent à maintenir l'état de charge de la batterie dans une fenêtre spécifique pour garantir dans tous les cas de figure les performances du véhicule. Cette capacité à maintenir l'état de charge de la batterie dépend de la différence entre la puissance moyenne demandée sur les cycles et la puissance de recharge du système à bord du véhicule, c'est-à-dire du dimensionnement effectué.

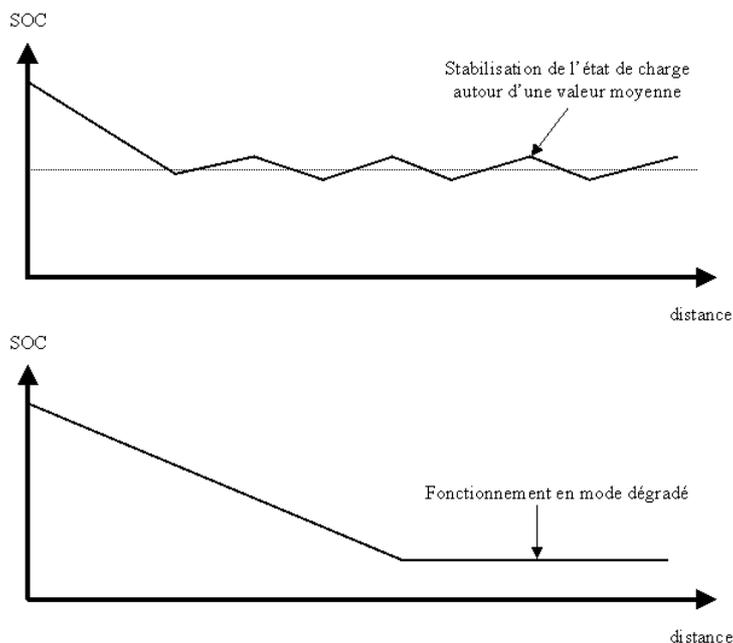


Figure 1.11 – Exemples de fonctionnement du véhicule avec maintien de l'état de charge SOC (haut) et décharge de la batterie (bas).

5.3 - Etat de l'art des lois de gestion d'énergie.

Ce paragraphe retrace l'évolution des lois de gestion d'énergie "classiques" à partir de l'étude des lois de démarrage/arrêt du moteur thermique et de la détermination de son point de fonctionnement. Ensuite, il fait le point sur les commandes plus évoluées, telles que l'utilisation de logique floue, la définition de plusieurs lois de commande ou la prise en compte d'informations sur le cycle suivi.

5.3.1 - Evolution des lois de gestion d'énergie "classiques".

Les lois de gestion d'énergie doivent gérer de façon optimale la répartition des différents modes de fonctionnement du véhicule hybride, tout en assurant les prestations attendues par le conducteur. Ces algorithmes doivent donc déterminer le démarrage et l'arrêt du moteur thermique. Puis lorsque celui-ci est en fonctionnement, ils doivent fournir le meilleur point de fonctionnement des différents organes.

Les lois de démarrage/arrêt du moteur thermique se traduisent le plus souvent par des hystérésis pour éviter les démarrages et arrêts incessants autour des valeurs de seuils. La variable la plus utilisée est l'état de charge de la batterie qui doit être maintenu à un niveau acceptable comme on le

retrouve dans [Hochgraf-C., Ryan-M, Wiegman-H, 1996] et [Duoba-M, Larsen-R, 1998]. D'autres variables également utilisées sous forme d'hystérésis, telles que la vitesse du véhicule, le couple ou le plus souvent la puissance demandée, sont associées à l'état de charge de la batterie pour démarrer le moteur thermique ([Furutani-M, 1996], [Jalil-N, Kheir-N, Salman-M, 1997]). Cette action a pour but de prendre en compte la satisfaction de la demande du conducteur. Il est également possible de prendre en compte des contraintes thermiques comme la température de la batterie ou celle du moteur électrique ([Tuzuki-S, Moroto-S, Yamaguchi-K, et al., 1997]) pour modifier le démarrage / arrêt du moteur thermique.

Une fois la décision de démarrer ou pas le moteur thermique prise, il faut fixer son point de fonctionnement. Une première méthode [Anderson-C, Pettit-Erin, 1995] consiste à l'utiliser comme dans un véhicule conventionnel. Celui-ci fournit la puissance demandée par le conducteur, le moteur électrique et la batterie servant à la fois à récupérer une partie de l'énergie de décélération (freinage récupératif) et à fournir un supplément de puissance lorsque le moteur thermique est insuffisant. Une première amélioration de cette méthode, pour limiter la zone de fonctionnement du moteur thermique et les transitoires, consiste à délivrer une puissance constante correspondant à la moyenne de l'énergie consommée sur une partie du cycle déjà réalisée ou à utiliser les points de meilleur rendement du moteur thermique (obtenus pour des couples élevés). Dans ce cas, la batterie fournit le surplus de puissance nécessaire à assurer la demande instantanée du conducteur et est rechargée lorsque la puissance demandée est inférieure à la puissance moyenne calculée. Plutôt que de prendre en compte uniquement le rendement du moteur thermique, il est aussi envisagé d'utiliser le rendement de la chaîne de traction dans son ensemble ([Brigham-D, Giardini-S, Lev-A et al., 1998], [Ibarki-R, Taga-Y, Haga-H, et al., 1997]). Il s'agit, dans ce cas, de choisir, parmi toutes les combinaisons possibles de répartition de la puissance, celle qui minimise ce rendement " global " calculé en prenant en compte l'énergie stockée et déstockée dans la batterie et sa compensation ultérieure. Pour cela, une modélisation spécifique est nécessaire : par exemple, [Kim-C, NamGoong-E, Lee-Sl, et al., 1999] modélise les systèmes chimiques et électriques sous forme de modèles équivalents thermiques.

5.3.2 - Utilisation de règles floues.

Les lois décrites précédemment deviennent relativement complexes et font intervenir de nombreuses entrées, pouvant parfois même être couplées entre elles. Aussi, de nombreux articles préconisent une formulation sous forme de règles floues ([Baumann-B, Washigton-G, Glenne-B, Rizzoni-G, 2000], [Baumann-B, Rizzoni-G, Washington-G, 1998], [Glenn-B, Washington-G, Rizzoni-G, 2000], [Ibaraki-R, 1998], [Salman-M, Schouten-N, Kheir-N, 2000]). Cette méthode permet une meilleure compréhension de la gestion d'énergie et améliore, de plus, le confort de conduite par des changements de mode de fonctionnement plus souples. Dans [Koo-E, Lee-H, Sul-S, et al., 1998], le correcteur flou du véhicule est divisé en deux blocs : le " Power Balance Controller " qui gère l'état de charge de la batterie et les émissions polluantes est équivalent au bloc de gestion d'énergie de la Figure I.10 et le " Driver's Intention Predictor " qui sert à déterminer la demande du

conducteur correspondant donc au bloc d'interprétation de la demande. La thèse [Farall-S, 1993] " A study in the use of Fuzzy Logic in the Management of an Automative Heat Engine/Electric Vehicle Powertrain " propose de faire évoluer les règles floues pour améliorer le confort et l'adapter à l'utilisateur.

Mais ces améliorations ne semblent pas suffisantes pour utiliser au mieux toutes les possibilités offertes par le véhicule hybride. En effet, les publications [An-F, Barth-M, Scora-G, 1997] et [An-F, Barth-M, 1998] de l'université de Californie comparent en simulation la consommation et les émissions polluantes de plusieurs véhicules (véhicules thermiques, électriques et hybrides) sur cinq cycles différents. Il apparaît qu'une commande prenant en compte des éléments tels que le trafic, le conducteur, la durée du trajet, le type de route rencontré... est nécessaire à l'amélioration de la commande des véhicules hybrides. La suite de ce paragraphe explore les publications faites sur ce sujet.

5.3.3 - Prise en compte d'informations sur le trajet.

Pour améliorer les lois de gestion d'énergie, une première possibilité consiste à utiliser des informations sur le trafic (ou plus généralement la route), le conducteur, les conditions météorologiques, le poids du véhicule (pour les véhicules industriels) pour définir plusieurs lois de commande adaptées à chaque environnement ainsi défini. Par exemple, dans le document [Drozd-P, Fitzpatrick-N, Ghelesel-A, et al., 1996], trois types de route sont distingués: vitesse stabilisée, accélération ou pente faibles; urbain; montagne ou vitesse stabilisée élevée. Chaque catégorie correspond à des lois spécifiques appliquées par le superviseur après détection de l'environnement. Des commandes spécifiques ont également été développées pour limiter les émissions polluantes dans les embouteillages. Dans d'autres cas, on cherche à prédire les changements de mode de fonctionnement de l'hybride pour en limiter leur nombre. C'est le cas du brevet [Ibarki-R, Taga-Y, Haga-H, et al., 1997] qui utilise des informations sur le poids du véhicule, la pente de la route, la différence de température entre extérieur et intérieur, la dérivée de l'accélération positive, pour anticiper la demande aussi bien en traction que pour le fonctionnement des auxiliaires.

La définition de plusieurs lois de commande pour le véhicule hybride constitue le premier pas dans la prise en compte de l'environnement dans la gestion de l'énergie à bord. L'étape suivante consiste à utiliser la connaissance du parcours suivi par le véhicule. Ce pas est facilement franchi à l'évocation des systèmes de navigation et de localisation ([Takahiro-I, Shuzo-M, Hideki-N, 1999]). L'université de Warwick [Bourne-C, Faithfull-P, Quigley-C, 1996], [Quigley-C, Ball-R, Vinsome-A, et al., 1995] et [Quigley-C, Ball-R, Vinsome-A, et al., 1996] évoquent l'utilisation des connaissances sur les trajets journaliers pour une meilleure gestion du véhicule hybride. Les méthodes décrites précédemment (utilisation du flou, d'informations de haut niveau) sont bien sûr également appliquées à ces trajets régulièrement suivis et si le parcours n'est pas reconnu, une commande traditionnelle peut être appliquée. La reconnaissance d'un parcours nécessite d'avoir accès à des informations fiables (heure et localisation de départ et d'arrivée par

exemple), aussi beaucoup de documents envisagent l'utilisation des nouveaux moyens de communication tels que le GPS.

5.4 - Conclusion.

Cette recherche a permis de mettre en évidence l'intérêt de nombreux industriels et universitaires sur l'utilisation de commandes évoluées dans la gestion de l'énergie des véhicules hybrides. Historiquement, les premières évolutions ont consisté à utiliser des raisonnements flous pour permettre des changements de mode de fonctionnement plus souples. Ensuite, des commandes n'utilisant pas directement les informations provenant du véhicule (vitesse, SOC...) ou du conducteur, ont été envisagées. Il s'agit, dans ce cas, de commuter entre plusieurs lois dépendant du type de route, de trafic, de conducteur... détectés. Enfin, une troisième piste propose de prendre en compte le trajet suivi dans la gestion d'énergie. Il s'agit d'utiliser de nouvelles entrées provenant de la connaissance du futur (durée du trajet, distance parcourue, quantité d'énergie nécessaire...). Dans la majorité de ces commandes, il semble important de posséder des informations complémentaires pour optimiser la gestion d'énergie. Dans ce domaine, les systèmes de navigation apparaissent comme une source d'informations souvent envisagée dans la gestion d'énergie des véhicules hybrides.

L'évolution des lois de gestion d'énergie décrite ci-dessus a également été suivie au sein de Renault. Elle s'est traduite par le dépôt de nombreux brevets. On peut citer : [Borgeaud-Y Hémédinger-S, Caillard-B, et al., 1997], [Chauvelier-E, 1998], [Chauvelier-E, Sahroui-O, 1998], [Béguery-P, Hémédinger-S, 1999], [Chauvelier-E, 1999], [Chauvelier-E, Hémédinger-S, Pannequin-W, 1999], [Hémédinger-S, Babani-P, 1999], [Chauvelier-E, Coutier-T, 1999], [Chauvelier-E, 2000], [Chauvelier-E, Coulon-JF, 2000], [Béguery-P, Dubray-A, 2000]. La thèse, dont les objectifs vont être décrits maintenant, s'inscrit donc dans la continuité des travaux déjà effectués sur les lois de gestion d'énergie.

6 - Conclusion : objectifs de la thèse.

Les lois de gestion d'énergie développées à ce jour ne prennent pas en compte l'utilisation précise du véhicule, alors que les résultats obtenus peuvent en dépendre fortement. L'objectif de la thèse est donc de construire des lois de gestion d'énergie susceptibles d'être embarquées dans le véhicule et prenant en compte le trajet effectué. Plus précisément, il s'agit d'améliorer les lois de gestion d'énergie du véhicule pour quelques trajets qui constituent l'essentiel de son utilisation. De plus, la notion de lois de gestion d'énergie embarquables implique quelques contraintes fortes : la commande développée devra être relativement simple, pour permettre son implantation dans un calculateur automobile, et une attention particulière devra être portée sur l'espace mémoire nécessaire à la sauvegarde des informations sur le trajet effectué, pour permettre une application sur système réel à faible surcoût.

Le sujet d'application de la thèse concerne en priorité les véhicules effectuant régulièrement les mêmes parcours. Le bus hybride (hybride série) a donc été choisi en raison de la répétitivité de ses trajets et de la présence plus courante d'équipements de type « systèmes de navigation » ou « système d'aide à l'exploitation » pour l'obtention d'informations sur le trajet suivi.

Chapitre II - LE BUS HYBRIDE ET SON MODELE DE SIMULATION.

L'application de la thèse concerne un bus hybride de type série, sans recharge externe de la batterie, mais disposant d'une autonomie électrique de quelques kilomètres. Même si le rendement global de ce type de chaîne de traction reste faible, cette architecture permet à la fois d'optimiser le freinage récupératif et le fonctionnement du moteur thermique. En effet, le moteur thermique n'étant pas lié directement aux roues du véhicule, son régime n'est pas imposé par la vitesse du véhicule. Ce degré de liberté peut alors être utilisé pour optimiser le rendement du générateur électrique (association du moteur thermique et de l'alternateur).

Pour évaluer le potentiel des lois de gestion d'énergie envisagées, un modèle complet du véhicule a été développé sous MATLAB/SIMULINK. Il intègre non seulement les organes de traction (générateur électrique, batterie et moteurs électriques de traction), mais aussi une modélisation simplifiée des principaux auxiliaires présents dans ce type de véhicule. De plus, il est adapté à l'utilisation de cycles de roulage réalistes, c'est-à-dire qu'il utilise des profils de vitesse et de pente provenant d'enregistrements réalisés en situation réelle.

En définitive, le modèle obtenu est relativement complexe et fortement non linéaire. Certains composants ne sont connus qu'au travers de cartographies obtenues lors des tests des composants.

La pollution des véhicules, en particulier pour les véhicules de transport en commun, est actuellement un sujet crucial. A titre d'exemple, comme le montre le Tableau II.1, la législation européenne a divisé par deux, en 7 ans (d'euro 1 à euro 3), les émissions des moteurs diesels. La recherche s'est donc penchée sur ce problème à travers le développement de nouveaux carburants : on peut citer le gazole désulfuré, le diester (carburant produit à partir d'huile de colza), l'aquazole (émulsion eau-gazole), le GNV (Gaz Naturel pour Véhicules), le GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié). Une autre voie de recherche consiste à électrifier la chaîne de traction : trolley, véhicule à pile à combustible... La conservation de l'autonomie du véhicule vis à vis des bus conventionnels et l'absence d'infrastructure spécifique a également mis en avant le bus hybride, [Bouwman-R, 2001], [Khuwatsamrit-Suang, Schieman-R, 2000], [Kumagai-N, Motooka-A, Takeda-N et al., 2001]. Actuellement, Mercedes commercialise le CITO, un minibus hybride (de 8 à 10 m).

Norme	Euro 0	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4
Oxydes d'azote (Nox)	14,4	8,0	7,0	5,0	3,5
Monoxyde de carbone (CO)	11,2	4,5	4,0	2,1	1,5
Hydrocarbures	2,4	1,1	1,1	0,66	0,46
Particules de suie	-	0,36	0,15	0,1	0,02

Tableau II.1 - Normes européennes de pollution applicables aux moteurs diesels des véhicules de transport en commun en g/kWh.

Pour évaluer le potentiel de nouvelles lois de gestion d'énergie sur un véhicule hybride, la première étape consiste le plus souvent à tester cette commande en simulation. Ce chapitre présente donc le modèle de bus hybride développé sous MATLAB/SIMULIK, c'est-à-dire :

- ☞ les caractéristiques générales du bus hybride et son dimensionnement,
- ☞ le modèle global et les principaux composants (moteur thermique, moteurs électriques, batterie et auxiliaires),
- ☞ son utilisation sur des profils réalistes.

1 - Le sujet d'application : le bus hybride.

Le véhicule considéré est un hybride de type série, l'architecture la plus adaptée au bus. En effet, même si le rendement global de la chaîne de traction est relativement faible, cette architecture à propulsion électrique permet d'optimiser le freinage récupératif et son assemblage plus simple permet la réalisation de plancher plat. Pour le confort des passagers, le véhicule intègre des limiteurs d'accélération et de décélération (hors freinage d'urgence), ainsi que de jerk (dérivée de l'accélération). Le freinage est

réalisé préférentiellement sous forme de freinage récupératif pour diminuer la consommation du véhicule. Si l'énergie de freinage ne peut être totalement récupérée dans la batterie, des résistances électriques permettent de dissiper sous forme de chaleur le surplus d'énergie.

1.1 - Le dimensionnement.

La base de dimensionnement choisie est un véhicule standard de 12 m, de 19 tonnes de charge maximale et de 15 tonnes à vide. Ce bus ne dispose que d'un seul essieu moteur où deux moteurs de traction de 80 kW chacun sont susceptibles d'être intégrés dans les roues. Le dimensionnement des deux sources d'énergie doit permettre :

- ∞ pour le générateur électrique, d'assurer la puissance moyenne d'utilisation du véhicule, puisque aucune recharge externe de la batterie n'est envisagée,

- ∞ pour la batterie, d'assurer, en complément du générateur électrique, l'obtention de la puissance maximale du bus (en considérant à la fois la traction et les auxiliaires) et de permettre une autonomie en mode tout électrique de quelques kilomètres.

Avec ces hypothèses, le moteur diesel a été sous-dimensionné vis-à-vis d'un véhicule conventionnel : il fournit au maximum 128 kW. De plus, le composant appartient à la catégorie des moteurs industriels, c'est-à-dire qu'il a été spécifié pour disposer d'une durée vie importante. En particulier, ses plages d'utilisation en couple et en régime ont été limitées.

En ce qui concerne la batterie, le véhicule hybride ne pourra pas intégrer une batterie au plomb comme dans un véhicule conventionnel, puisque l'énergie et la puissance massiques de ce type de technologie sont très largement insuffisantes. D'autres technologies, telles que les batteries Nickel-Cadmium, Nickel-MetalHydrure, Lithium-Ion,... sont donc apparues successivement dans le but de résoudre ce problème. Cette dernière, apparue dans les années 1990, semble être une solution prometteuse à moyen ou long terme pour les véhicules hybrides, même si de nombreuses incertitudes persistent concernant leur durée de vie et leur recyclage. Dans le cadre de notre étude, cette technologie Lithium-Ion a donc été choisie. La batterie devra fournir une centaine de kilowatts pour ne pas dégrader les performances du véhicule avec les auxiliaires en fonctionnement et devra disposer d'une énergie non négligeable (de l'ordre de 20 kWh) pour permettre une autonomie électrique de quelques kilomètres. Dans ces conditions, la technologie Lithium-Ion la plus adaptée est du type Medium-Range, solution intermédiaire entre les batteries Haute Energie et les batteries Haute Puissance.

Les deux sources d'énergie étant globalement définies, l'étape suivante consiste à assembler les différents composants pour former le modèle global de simulation d'un hybride série. La présentation générale du modèle de bus développé sous MATLAB/SIMULINK est l'objet du paragraphe ci-dessous.

1.2 - Le modèle de simulation.

Les modèles de composants, utilisés en interne chez Renault et décrits brièvement dans le deuxième paragraphe de ce chapitre, ont permis la simulation de plusieurs véhicules hybrides. Ils ont largement été inspirés de la bibliothèque de composants HYZEM-LIB (Hybrid technology approaching efficient Zero Emission Mobility Library), développée par la société Ricardo Consulting Engineers Ltd ([Heath-RPG, 1997]) dans le cadre du programme européen HYZEM. Des études comparables sont réalisées en dehors de l'Europe avec par exemple [Rousseau-A, Sharer-P, Pasquier-M, 2001] par l'intermédiaire du partenariat américain PNVG (Partnership for a New Generation of Vehicles) ou le logiciel ADVISOR (Advanced Vehicle Simulator) dans [Senger-R, Merkle-M, Nelson-D, 1998] ou encore VP-SIM (Vehicle Performance Simulator) dans [Rizzoni-G, Guezennec-Y, Brahma-A et al., 2000]. L'utilisation de l'outil SIMULINK se retrouve dans la majorité des études effectuées en raison de son organisation modulaire adaptée à la diversité des architectures.

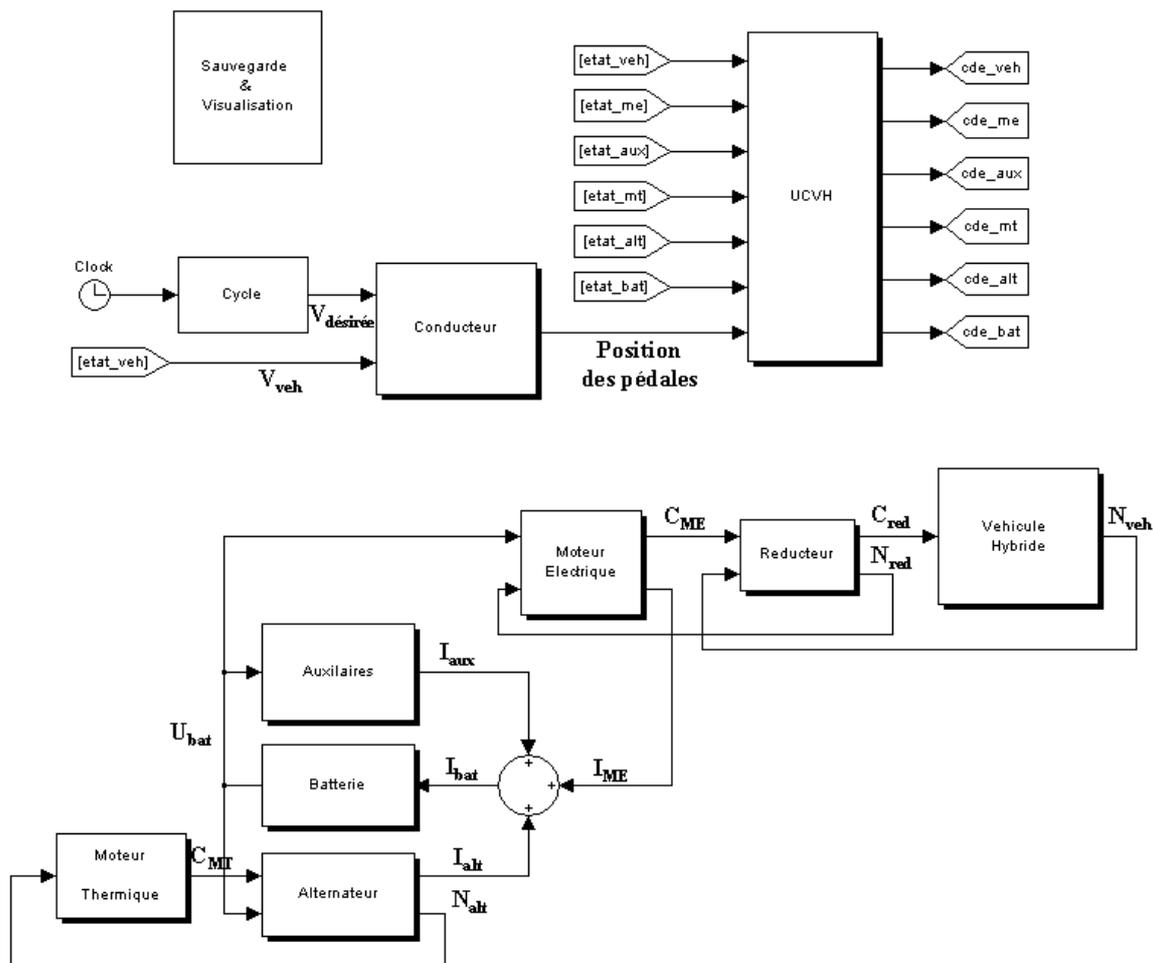


Figure II.1 – Modèle global du véhicule hybride série et de sa commande.

Dans le cadre de cette étude, les modèles de composants ont été assemblés pour former l'architecture choisie pour le bus hybride, l'architecture série. Le modèle global SIMULINK visualisé sur la Figure II.1 regroupe tous les éléments présentés dans le premier chapitre (Figure I.10) :

- ☞ le modèle conducteur,
- ☞ l'UCVH (Unité de Contrôle du Véhicule Hybride) qui regroupe toute la partie commande du système,
- ☞ les principaux organes du véhicule, le moteur thermique associé à son alternateur, les moteurs électriques⁴ liés aux roues du véhicule⁵ via un réducteur, la batterie et les auxiliaires.

Le calcul des états du véhicule est effectué à l'intérieur de chacun des organes. L'UCVH récupère ces informations dans les labels `etat_XX` et renvoie les consignes de commande dans `cde_XX`.

Cette représentation permet de visualiser la principale caractéristique de l'hybride série : la création d'un nœud de puissance au niveau de la batterie qui impose la tension du système électrique. Cette spécificité sera utilisée dans l'optimisation du système décrite dans le chapitre III de ce mémoire. Nous allons maintenant détailler la commande de chaque organe.

2 - Présentation des principaux organes.

La traction du véhicule hybride est assurée par trois éléments :

- ☞ le générateur électrique (association du moteur thermique et d'un alternateur),
- ☞ la batterie,
- ☞ les moteurs électriques liés aux roues via des réducteurs,

dont nous allons détailler les caractéristiques à la fois du point de vue du modèle et de la commande.

2.1 - Le générateur électrique.

Le modèle du moteur thermique, commandé en couple, se rapporte principalement à un ensemble de tables caractéristiques du composant. En particulier, la consommation du moteur est évaluée à partir d'une table de consommation instantanée, établie sur banc moteur en fonctionnement stabilisé et dépendant de deux paramètres le régime du moteur et son couple. Le moteur thermique est couplé à un alternateur, également commandé en

⁴ Les moteurs électriques de traction étant identiques, un seul moteur est ici représenté.

⁵ Le bloc véhicule correspond à l'équation de la dynamique décrite dans le chapitre I (équations I.1 à I.7).

couple. Les pertes à ce niveau sont modélisées à partir d'une cartographie de rendement.

2.1.1 - Caractéristiques générales du modèle.

En pratique, la consommation du moteur est visualisée en fonction de l'énergie produite, dans le plan couple/régime, sous forme de courbes de consommation constante. Nous représentons, non pas la consommation instantanée en g/s, mais la consommation spécifique en g/kWh comme le montre la Figure II.2. De plus, le modèle utilisé prend en compte la limitation du couple moteur, fonction du régime et visualisée en noir sur la figure. Par contre, pour le moteur considéré, les émissions polluantes ne sont pas évaluées (données non disponibles).

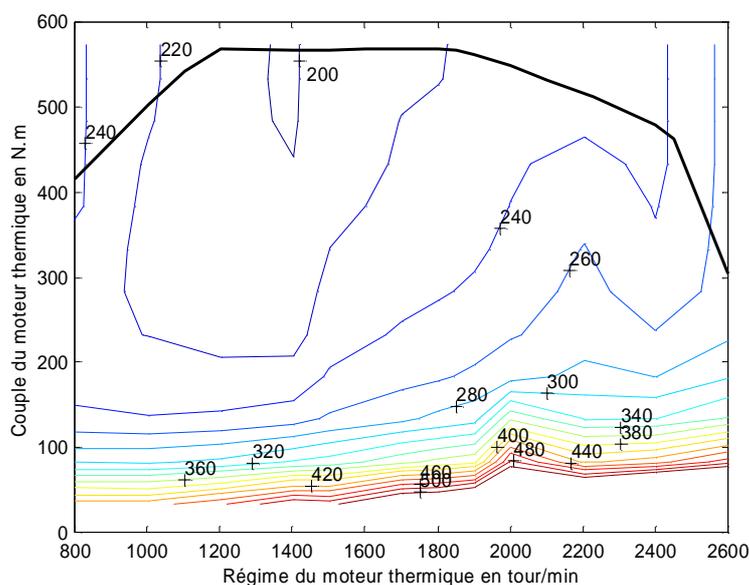


Figure II.2 – Cartographie de consommation spécifique du moteur thermique.

2.1.2 - Spécificité de l'hybride série.

Dans un véhicule conventionnel, pour une vitesse véhicule et un rapport de boîte de vitesse donnés, le régime du moteur thermique est imposé. Pour fournir une certaine puissance, il suffit donc de déterminer le couple correspondant. Dans un hybride série, le moteur thermique n'est pas directement lié aux roues du véhicule : il n'existe donc pas de lien entre la vitesse du véhicule et le régime du moteur. Pour fournir une certaine puissance, nous disposons dans ces conditions d'une infinité de solutions « couple et régime associé » appartenant au domaine admissible. L'apparition de ce degré de liberté va être utilisé pour optimiser le fonctionnement du moteur thermique ou par extension du générateur électrique. Plus précisément, sur chaque iso-puissance du générateur électrique, la meilleure association couple/régime du moteur thermique, c'est-à-dire celle qui minimise la consommation spécifique, est déterminée. Nous obtenons ainsi la courbe des meilleurs points de fonctionnement du générateur électrique. Cette courbe est visualisée en rouge sur la Figure II.3 ci-dessous.

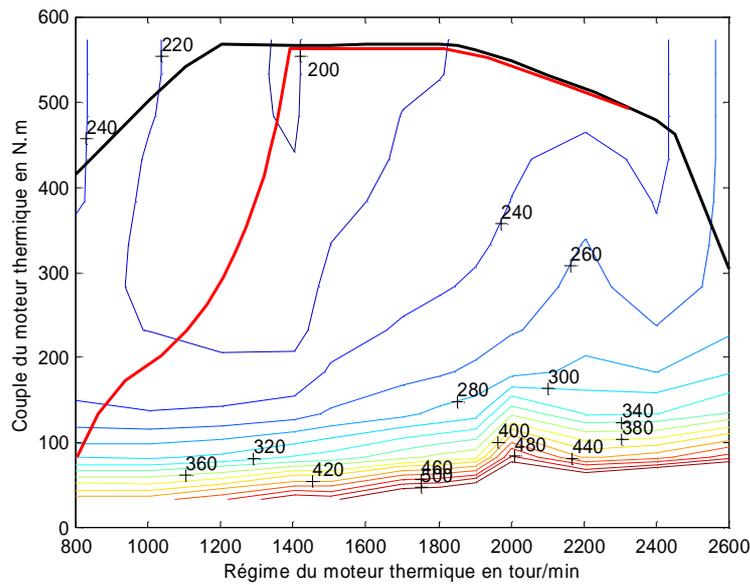


Figure II.3 – Courbe des meilleurs points de fonctionnement du moteur thermique.

2.1.3 - Commande du générateur électrique.

Dans le générateur électrique, l’alternateur va avoir un double rôle. En effet, il sert naturellement de convertisseur d’énergie mécanique fournie par le moteur thermique en énergie électrique fournie à la batterie. Mais il va également être utilisé dans les transitoires pour permettre les changements de régime du moteur thermique. En particulier en phase de démarrage, il va puiser dans la batterie et permettre au moteur thermique d’atteindre son régime de ralenti.

Concrètement, les lois de gestion d’énergie définissent la puissance fournie par le générateur électrique P_g . Cette puissance peut être décomposée, d’après les remarques précédentes, en un ensemble couple-régime du moteur thermique minimisant la consommation spécifique du générateur électrique, autrement dit :

$$P_g = \rho_{alt} \cdot N_{MT_opt} \cdot C_{MT_opt} \quad \text{équation II.1}$$

et il est alors possible de définir la fonction C_{opt} telle que :

$$C_{MT_opt} = C_{opt}(N_{MT_opt}) \quad \text{équation II.2}$$

Pour minimiser la consommation du moteur thermique, nous allons forcer son fonctionnement sur sa courbe des meilleurs points de fonctionnement. Plus précisément, si à un instant donné, le régime du moteur thermique est N_{MT} , nous allons lui demander de fournir :

$$C_{MT} = C_{opt}(N_{MT}) \quad \text{équation II.3}$$

même si la puissance obtenue est différente de celle demandée par les lois de gestion d'énergie. L'alternateur va alors être utilisé pour amener le moteur thermique au régime désiré N_{MT_opt} . Pour cela, la commande de l'alternateur va être :

$$C_{alt} = \beta \cdot (N_{MT_opt} - N_{MT}) - C_{MT} \quad \text{équation II.4}$$

où β est un facteur constant.

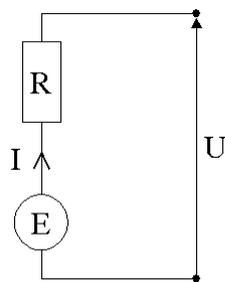
En fonctionnement stabilisé ($N_{MT} = N_{MT_opt}$), l'alternateur transmet simplement la puissance du moteur thermique à la batterie et/ou aux moteurs électriques ($C_{alt} = -C_{MT}$). En fonctionnement transitoire, et en particulier en phase de démarrage du moteur, il fournit un couple permettant les montées en régime. La batterie est alors utilisée comme source d'énergie du démarrage du moteur. En phase de décélération du moteur thermique, l'alternateur peut recharger la batterie en récupérant cette énergie (effet de faible importance).

2.2 - La batterie.

La seconde source d'énergie disponible à bord du véhicule est la batterie de type Lithium-Ion. Vis à vis du moteur thermique, les batteries sont en général mal connues et de nombreuses incertitudes restent concernant leur vieillissement. Le modèle utilisé est donc relativement simple comparé à d'autres [He-X, 2001], [Bhatikar-S, Mahajan-R, Wipke-K, et al., 2000-01-1564], mais il est renseigné à partir d'études précises faites sur le composant.

2.2.1 - Caractéristiques générales du modèle.

La batterie est décrite à partir d'un assemblage en série et en parallèle de cellules, modélisées sous forme d'une tension à vide E_0 et d'une résistance interne R_0 . En définitive, le modèle batterie utilisé correspond à celui de la Figure II.4 avec $Nb_{série}$ cellules en série et $Nb_{parallèle}$ branches en parallèle :



$$E = Nb_{série} * E_0 \quad \text{équation II.5}$$

$$R = \frac{Nb_{série}}{Nb_{parallèle}} * R_0 \quad \text{équation II.6}$$

Figure II.4 - Modèle batterie utilisé.

Actuellement, ce modèle ne tient pas compte des variations de température de la batterie au cours de son utilisation. Par contre, en mode freinage récupératif, le courant de recharge est limité : le surplus possible d'énergie est perdu, dissipé par exemple, dans un rhéostat.

La résistance interne et la tension à vide de la batterie dépendent de son état de charge comme le montrent la Figure III.6 et la Figure II.6.

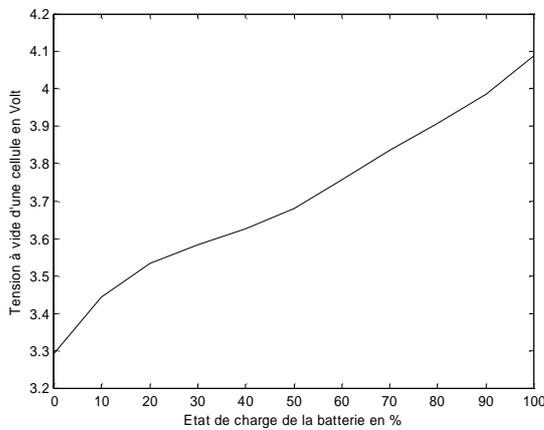


Figure II.5 – Tension à vide de la batterie E_0 .

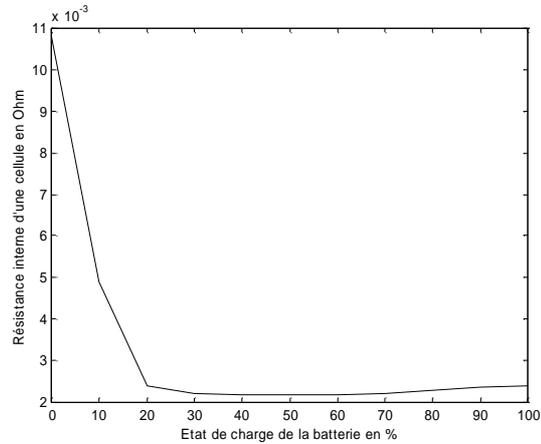


Figure II.6 – Résistance interne de la batterie R_0 .

L'état de charge ou SOC (State of Charge) caractérise la quantité d'énergie restante dans la batterie : il est obtenu par intégration du courant divisée par la capacité maximale de la batterie (équation ci-dessous).

$$SOC = \frac{\int I dt}{Q_{max} \cdot Nb_{parallèle}} \quad \text{équation II.7}$$

où Q_{max} est la capacité maximale d'un module (en C).

2.2.2 - Spécification pour le bus hybride.

Pour spécifier précisément la batterie utilisée, il reste à déterminer le nombre de cellules mises en série $Nb_{série}$ et le nombre de branches en parallèle $Nb_{parallèle}$. La batterie fixant la tension de fonctionnement des moteurs électriques, il est nécessaire que la tension E soit située dans leur plage de fonctionnement (350V nominal). En reprenant l'équation II.5, il est possible de déterminer le nombre de cellules mises en série, soit :

$$Nb_{série} = 96 \quad \text{équation II.8}$$

De plus, d'après le modèle de la Figure II.4, la puissance fournie par la batterie correspond à :

$$P = (E - R \cdot I) \cdot I \quad \text{équation II.9}$$

soit, en reportant les équations II.5 et II.6,

$$P = Nb_{série} E_0 \cdot I - \frac{Nb_{série}}{Nb_{parallèle}} * R_0 \cdot I^2 \quad \text{équation II.10}$$

La puissance maximale délivrée par la batterie est donc :

$$P_{\max} = Nb_{\text{série}} \cdot Nb_{\text{parallèle}} \cdot \frac{E_0^2}{4.R_0} \quad \text{équation II.11}$$

Par ailleurs, la batterie utilisée correspondant à une capacité élémentaire de 26Ah par cellule, l'énergie maximale stockée sera :

$$W_{\max} = \frac{26}{3600} \cdot Nb_{\text{parallèle}} \cdot Nb_{\text{série}} \cdot E_0 \quad \text{équation II.12}$$

En comparant les équations II.11 et II.12 pour déterminer celle qui est dimensionnante, le nombre de branche en parallèle est déterminé, soit :

$$Nb_{\text{parallèle}} = 2 \quad \text{équation II.13}$$

2.2.3 - Commande de la batterie.

La batterie n'est pas réellement commandée puisqu'elle doit fournir la différence entre la puissance demandée (puissance de traction et puissance des auxiliaires) et la puissance fournie par le générateur électrique. Par contre, son courant est limité en décharge et en recharge à la fois en continu (c'est-à-dire sur des durées de plusieurs dizaines de secondes) et en transitoire. La limitation dite « en continu » correspond aux contraintes qui seront intégrées dans les lois de gestion d'énergie pour répartir la demande entre les deux sources d'énergie. Sur de très courtes périodes correspondant aux transitoires, ces limitations peuvent être très largement dépassées (1,5 fois en décharge et 2,5 fois en recharge). A titre d'exemple, ce phénomène permet de démarrer le moteur thermique avec la batterie. En effet, le démarrage du moteur étant généralement demandé lors d'une forte demande de puissance, la batterie doit temporairement assurer seule à la fois la demande des moteurs électriques et des auxiliaires, et le démarrage du moteur thermique par l'intermédiaire du couple demandé par l'alternateur.

2.3 - Les moteurs électriques de traction.

Le bus hybride dispose de deux moteurs électriques de traction modélisés par des cartographies de pertes (plutôt que de rendement) qui permettent de prendre en compte les pertes à vide des moteurs. Chaque moteur de 80kW peut fournir au maximum 485N et est associé à un réducteur, modélisé par un rendement constant et une inertie, pour délivrer un couple à la roue du véhicule. Il est alors possible de déterminer la vitesse du véhicule par application du bilan des forces fait dans le premier chapitre (équations I.1 à I.6).

Les moteurs électriques qui caractérisent la traction du véhicule ne constituent pas la seule demande de puissance. En effet, dans un véhicule hybride la majorité des auxiliaires sont électriques et représentent une

demande de puissance non négligeable. Ce point est l'objet du paragraphe suivant.

3 - Le modèle des auxiliaires.

Aucun modèle simple d'auxiliaires de bus n'étant disponible dans la bibliothèque utilisée, plusieurs modèles basés uniquement sur une commande tout ou rien ont été développés à partir des travaux [Ceyzériat-F, 2000] sur la modélisation des auxiliaires d'un autobus à chaîne de traction électrique hybride. Plus précisément, deux types de modèles ont été utilisés : les modèles « taux de charge » où le fonctionnement est périodique et les modèles « porte » où le fonctionnement de l'auxiliaire est lié aux arrêts du véhicule.

3.1 - Description du modèle « taux de charge ».

Ce modèle représente les auxiliaires ayant un fonctionnement périodique à deux niveaux de puissance, de période T et de puissance moyenne constante. Comme le montre la Figure II.7, il est possible de définir le taux de charge τ de l'auxiliaire par :

$$\tau = \frac{T_{\text{nominale}}}{T} \quad \text{équation II.14}$$

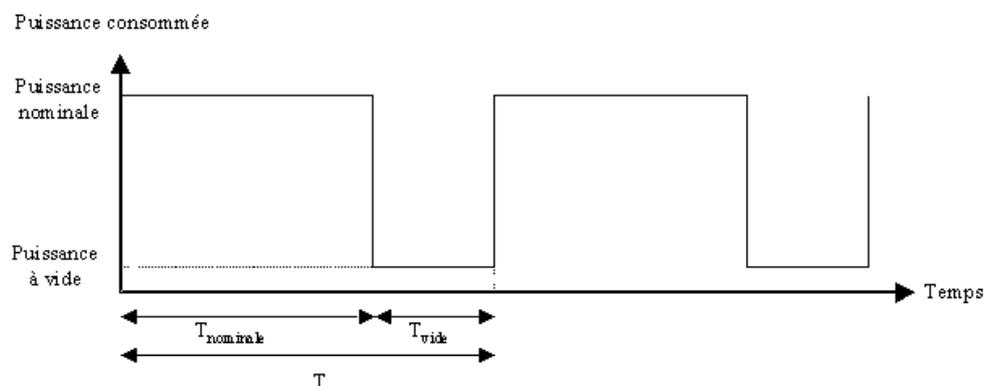


Figure II.7 - Principe du modèle « taux de charge ».

3.2 - Description du modèle « porte ».

Les auxiliaires liés au chauffage et à la climatisation ont, en plus du fonctionnement périodique précédent, un fonctionnement spécifique lié aux arrêts avec ouverture et fermeture de portes. En effet, lors de l'ouverture de porte, l'air présent dans l'habitacle peut être presque entièrement renouvelé

par de l'air extérieur, ce qui entraîne un fonctionnement ininterrompu des auxiliaires pendant la phase d'arrêt et pendant un temps donné après l'arrêt. Pour prendre en compte ce phénomène, un modèle dit « porte » est utilisé qui consiste à rendre l'auxiliaire actif durant l'arrêt avec ouverture des portes et pendant un temps proportionnel à la durée d'ouverture après la fermeture. Un exemple de profil obtenu est visualisé sur la Figure II.8.

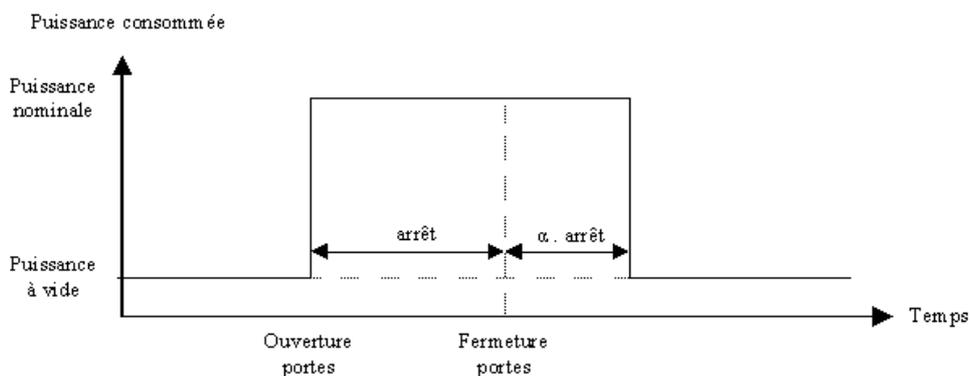


Figure II.8 - Principe du modèle « porte ».

3.3 - Présentation des auxiliaires du véhicule.

Les auxiliaires peuvent être classés en trois catégories, suivant leur tension d'alimentation : tension continue 24V, tension alternative de 230V, tension de la batterie (350V).

3.3.1 - Les auxiliaires alimentés par une tension continue 24V.

Ces auxiliaires comprennent les petits consommateurs dont le profil de consommation peut être lissé sur l'ensemble du parcours. On peut citer à titre d'exemple, l'éclairage intérieur, les feux, les mécanismes d'ouverture et fermeture de portes... Ils seront donc modélisés par une puissance constante dont la valeur pourra varier suivant la saison ou l'heure de la journée (nuit ou jour par exemple). Les ventilateurs de chauffage ou de climatisation sont aussi alimentés par une tension continue de 24V. Ils seront, eux, représentés par des modèles porte pour ceux utilisés par les passagers et un modèle taux de charge pour celui correspondant au conducteur du bus. Par ce principe, nous modélisons la surconsommation des auxiliaires au moment des arrêts avec ouverture de portes.

3.3.2 - Les auxiliaires alimentés par une tension efficace de 230V.

Ces auxiliaires sont majoritairement représentés par des modèles taux de charge : il s'agit de la pompe et du ventilateur de refroidissement de la chaîne de traction, de la pompe et du ventilateur de refroidissement de l'alternateur, du compresseur d'air. Seul le compresseur de climatisation est représenté par un modèle porte.

3.3.3 - Les auxiliaires alimentés directement sur la batterie.

Enfin, certains auxiliaires sont alimentés directement sur le réseau de la batterie à 350V. Ce sont principalement les éléments de chauffage (éléments à coefficient de température positif CTP et ventilateurs). Comme dans le cas de la climatisation, les éléments destinés aux passagers sont représentés sous forme de modèles taux de charge et ceux correspondant au conducteur par des modèles porte.

3.3.4 - Remarques.

Aux modèles présentés ci-dessus, il faut ajouter les convertisseurs de tension : convertisseur 350V continu en 24V continu et 350V continu en 230V alternatif. Leur modélisation a été effectuée par de simples rendements constants.

Les modèles ainsi obtenus ne sont pas totalement validés, puisqu'il existe de nombreuses incertitudes sur les niveaux de puissance et les périodes utilisés, mais ils permettent de prendre en compte un profil de consommation plus riche que celui obtenu à partir d'une puissance constante. Il est à noter que les modèles prennent très peu en compte la dépendance de la consommation des auxiliaires au cycle. Le refroidissement, par exemple, est complètement indépendant.

3.4 - Visualisation des profils d'auxiliaires obtenus.

Dans les modèles proposés, il est possible de choisir la saison été ou hiver, permettant principalement de faire le choix entre la mise en marche de la climatisation ou du chauffage. Les profils obtenus sont détaillés dans la Figure II.9 et la Figure II.10.

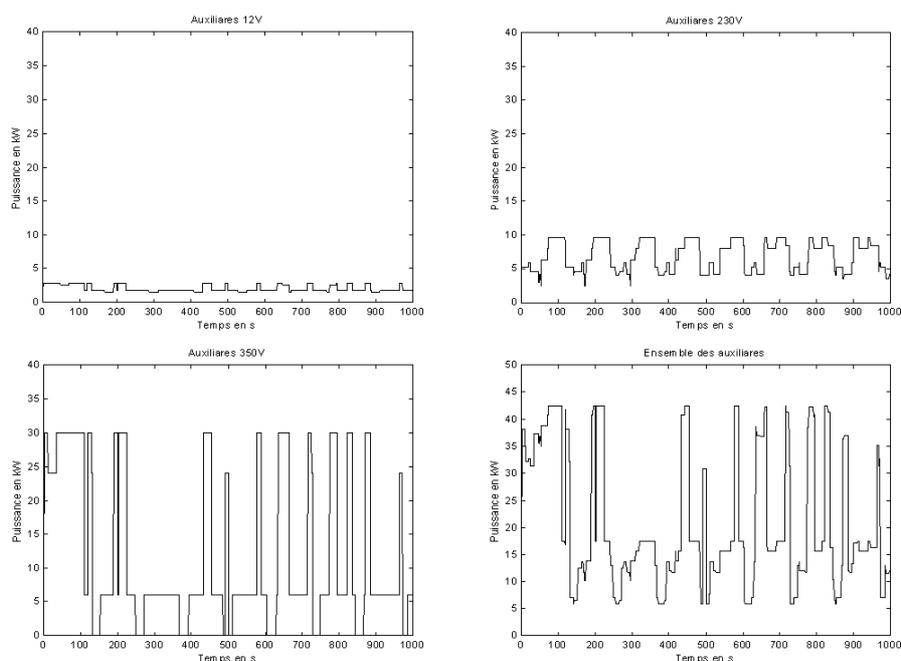


Figure II.9 - Exemple de profils d'auxiliaires en hiver.

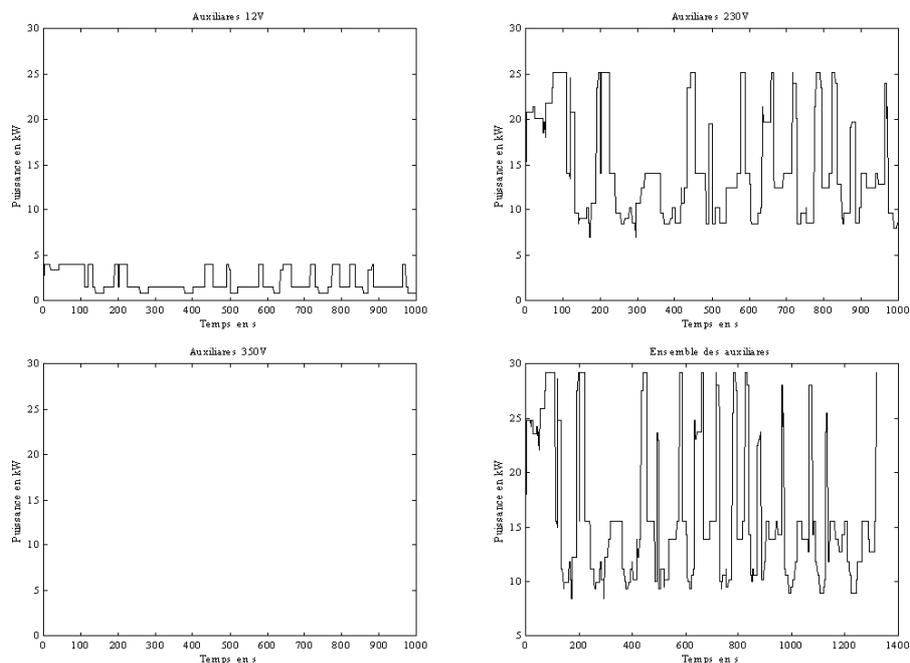


Figure II.10 - Exemple de profils d'auxiliaires en été.

L'auxiliaire le plus consommateur est le chauffage ou la climatisation ; en particulier les ouvertures de portes entraînent de très forts pics de puissance qui peuvent, de plus, s'additionner avec les puissances demandées par les modèles taux de charge. Dans toute la suite de ce mémoire, la demande de ces auxiliaires sera supposée non pilotable. Elle sera prise en compte par le système de gestion d'énergie au même titre que la puissance demandée par le moteur électrique. En fait, ces deux puissances sont ajoutées pour constituer la puissance électrique demandée totale. Une autre stratégie envisageable serait d'étudier les possibles degrés de liberté dans la gestion de la demande des auxiliaires non sécuritaires tels que la climatisation ou le chauffage. Cette étude suppose de connaître plus précisément à la fois les auxiliaires et les variations possibles respectant un niveau de confort acceptable pour le conducteur et ses passagers.

Avec l'introduction des auxiliaires du véhicule, le modèle obtenu représente l'intégralité des composants du bus hybride. A ce schéma général, il manque cependant, le principal intervenant, c'est-à-dire le chauffeur. Ce point va être détaillé dans le prochain paragraphe.

4 - Le modèle du conducteur.

Le conducteur du véhicule agit sur les pédales d'accélérateur et de frein pour atteindre sa consigne de vitesse. Cette consigne qu'il se fixe inconsciemment dépend principalement de l'environnement dans lequel il

évolue (une autoroute, une route de montagne, un embouteillage,...), mais également de sa nature (économique, sportive, agressive...). De nombreuses études ont déjà montré la difficulté de classer et caractériser ces deux phénomènes : [André-M, 1998] [Assemat-C, Briaud-S, Fauvel-F, 1998, [Tertois-S, Rat-JC, Tollis-C et al., 2000]... Mais avant toute autre chose, définissons la notion de cycle et de trajet.

4.1 - Notion de cycle et de trajet.

Un trajet constitue le fait d'aller d'un point A à un point B avec un certain véhicule. Il peut être caractérisé par des données moyennes telles que la vitesse et l'accélération moyennes. Le trajet n'est donc pas utilisable en simulation pour modéliser le conducteur et son action sur les pédales. C'est pourquoi il est nécessaire de disposer d'une réalisation d'un trajet particulier autrement nommé cycle de conduite. Le cycle est ainsi constitué d'un profil de vitesse et d'un profil de pente, définis en fonction du temps. Il ne s'agit pas des consignes désirées par le conducteur, mais bien de celles réalisées par le véhicule. Dans le cas du bus, il faut ajouter à ces deux données, pour définir entièrement le cycle, un profil d'ouverture/fermeture des portes (pour utiliser le modèle des auxiliaires) et éventuellement un profil de masse (pour prendre en compte la montée et la descente de passagers). Le cycle définit une réalisation de la volonté du conducteur sur un certain trajet ; il provient d'un enregistrement réalisé sur véhicule. Comme le montre la Figure II.11, les profils de vitesse obtenus sont très variables, en particulier la notion de zone à vitesse stabilisée, fréquente dans les cycles normatifs, n'existe quasiment plus.

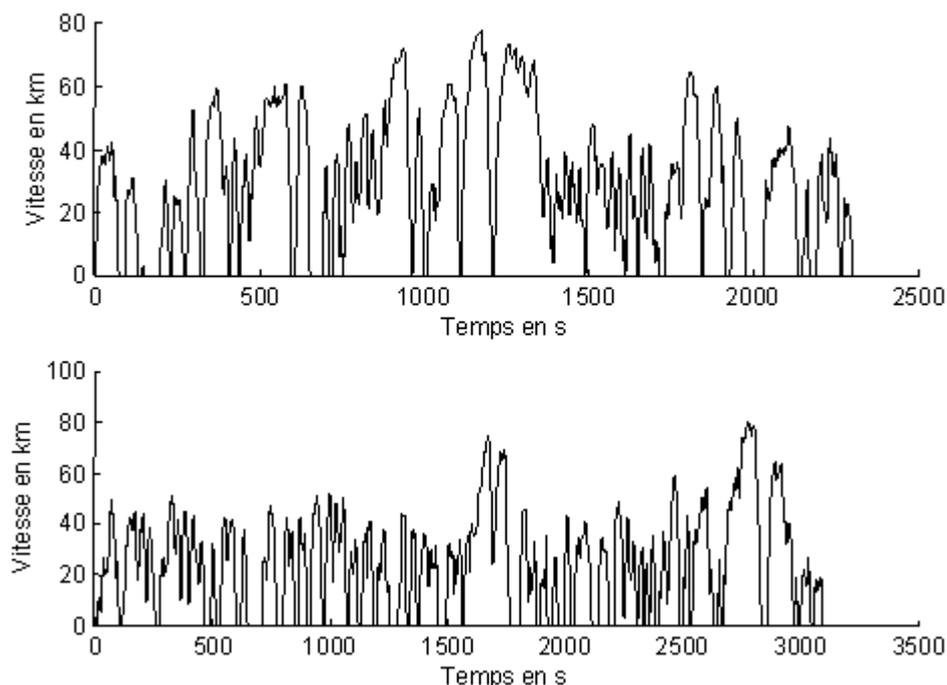


Figure II.11 - Exemples de différents profils de vitesse.

La notion de cycle prend donc en compte toutes les caractéristiques de réalisation (le conducteur, le trafic, la route...). Dans toute la suite, les cycles utilisés pour le développement et la validation de la méthode seront obtenus à partir de véhicules conventionnels. Les enregistrements de vitesse, comme ceux de la Figure II.11, constituent l'entrée du modèle conducteur, que nous allons développer dans le paragraphe suivant.

4.2 - Principe du modèle conducteur.

Dans ce qui suit, le conducteur est considéré comme un correcteur qui adapte l'action (la position des pédales) en fonction de l'écart entre la consigne de vitesse donnée par le cycle et la vitesse réelle du véhicule. Le modèle conducteur de la Figure II.12 est ainsi constitué de deux PI sur l'erreur de vitesse ($V_{désirée} - V_{veh}$) pour modéliser le fonctionnement en traction et en freinage. La sortie des correcteurs, suivant le cas considéré, est un pourcentage du couple maximal pouvant être fourni par le moteur électrique ou un pourcentage du couple maximal de freinage réalisable par le véhicule.

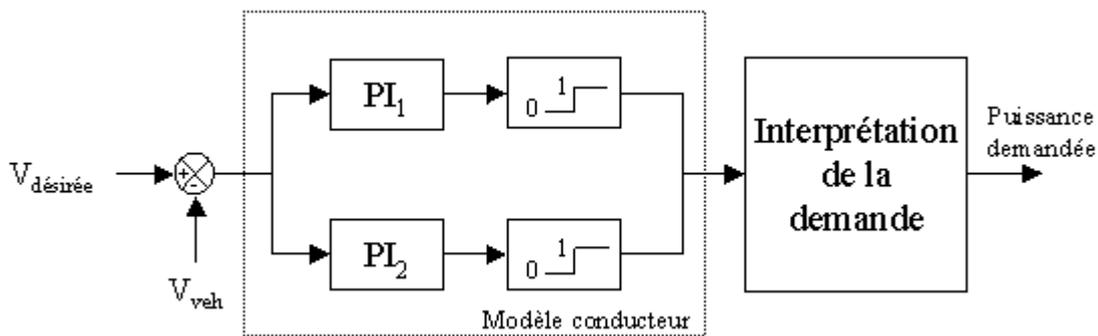


Figure II.12 - Principe du modèle du conducteur.

La dissociation des deux modes de fonctionnement (traction et freinage) permet de modéliser la conduite du bus qui nécessite de fortes actions en traction pour assurer la demande, tout en optimisant le freinage récupératif. En effet, si le freinage est trop brusque, une grande partie de l'énergie initialement récupérable sera en réalité perdue à cause des limitations du courant de recharge de la batterie. Dans la pratique, le conducteur utilisant un véhicule disposant d'un mode de freinage récupératif (c'est-à-dire un véhicule électrique ou hybride) a tendance à anticiper son freinage. Ce modèle permet donc d'obtenir ce phénomène sur des cycles réalisés à partir de véhicules conventionnels.

Pour assurer le confort des passagers, le fonctionnement des bus est limité en accélération et en jerk⁶. Ce phénomène est représenté par le bloc « Interprétation de la demande » qui modifie la sortie des correcteurs pour garantir le respect de ces limitations et transforme cette consigne en consigne de puissance demandée.

⁶ Dérivée de l'accélération.

5 - Conclusion.

Ce chapitre a été consacré à la définition de l'application de la thèse : il s'agit d'un bus hybride de 12m modélisé sous MATLAB/SIMULINK. Les principaux organes du véhicule, autrement dit le générateur électrique, la batterie, les moteurs électriques de traction et les auxiliaires, ont été dimensionnés de sorte que le véhicule dispose d'une autonomie de quelques kilomètres en mode électrique, tout en ayant des performances identiques au véhicule conventionnel.

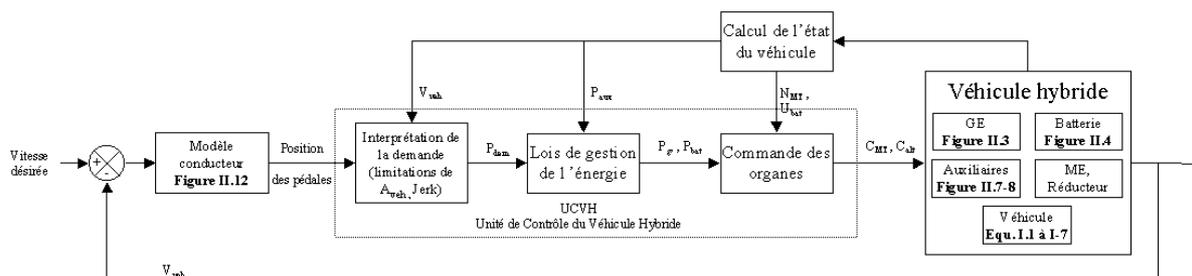


Figure II.13 – Schéma général de la commande d'un hybride série.

Comme le montre la Figure II.13, nous disposons maintenant d'un outil de simulation complet permettant à la fois de comparer des lois de gestion d'énergie entre elles et d'étudier l'impact des cycles de roulage sur des lois spécifiques. Il est à souligner que ce modèle du système global est relativement complexe, fortement non linéaire et qu'il intègre de nombreuses cartographies pour définir certains composants. Nous allons voir, dans le prochain chapitre, comment ces remarques vont influencer les différentes étapes de la construction de lois de gestion d'énergie optimisées.

Chapitre III - OPTIMISATION DES LOIS DE GESTION D'ÉNERGIE.

Pour les véhicules hybrides, les lois de gestion de l'énergie consistent à déterminer la répartition de la puissance demandée par le conducteur entre les différentes sources d'énergie, de manière à optimiser le fonctionnement de la chaîne de traction. Ce chapitre présente les différentes étapes du développement de lois de gestion d'énergie pour un hybride série.

La première étape consiste à formaliser le problème d'optimisation de la consommation, à l'aide de modèles simplifiés de la batterie et du générateur électrique. La résolution par le principe du maximum de Pontryaguine permet d'obtenir des cartographies de commande optimale dépendantes d'un unique paramètre K .

Les résultats de cette conception hors-ligne, facilement interprétables, sont ensuite adaptés pour obtenir des lois de commande implémentables en-ligne. En particulier, des lois de « confort » ont été ajoutées pour limiter le nombre de démarrages/arrêts du moteur thermique.

Enfin, ces lois sont validées en simulation à partir du modèle complet de véhicule décrit dans le chapitre précédent.

Comme nous l'avons vu sur la Figure II.13, la commande générale d'un véhicule hybride a une structure hiérarchique :

- ∞ le plus bas niveau correspond à la commande des actionneurs ou aux régulations locales ;
- ∞ le niveau intermédiaire estime l'état des composants du véhicule, comme l'état de charge de la batterie ;
- ∞ enfin, les lois de gestion d'énergie définissent la meilleure répartition de l'énergie entre toutes les sources, afin de satisfaire la demande faite par le conducteur (par l'intermédiaire de ses actions sur les pédales d'accélérateur et de frein), d'optimiser la consommation d'énergie et de respecter les normes de pollution.

Plus précisément, les algorithmes de gestion d'énergie doivent déterminer à quel moment il est nécessaire de démarrer ou d'arrêter le moteur thermique et calculer les meilleurs points de fonctionnement des organes.

Dans ce chapitre, nous allons voir une méthodologie de développement de lois de gestion d'énergie pour un véhicule hybride. L'application sera réalisée sur le véhicule hybride série décrit précédemment, mais les résultats seront facilement transposables à toute autre architecture. Le problème est abordé comme un problème de commande optimale, résolu par application du principe du maximum de Pontryaguine. Les résultats obtenus sont ensuite adaptés pour obtenir des lois de commande implémentables en-ligne et validés en simulation. Mais avant de décrire plus précisément la méthode d'optimisation choisie, revenons sur la notion d'optimisation des lois de gestion d'énergie pour un véhicule hybride.

1 - Méthode locale ou méthode globale ?

L'optimisation des lois de gestion d'énergie des véhicules hybrides peut prendre différentes formes. Il est possible d'optimiser les lois issues de la connaissance d'experts ou bien d'extraire des lois des résultats du problème d'optimisation du fonctionnement d'un véhicule hybride sur un cycle donné. Nous allons voir dans ce paragraphe les avantages et inconvénients de ces deux approches et le positionnement de nos travaux dans ce cadre.

1.1 - Optimisation locale.

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre de ce mémoire, les premières lois de gestion d'énergie ont été tirées de l'expertise acquise sur les véhicules. La première phase d'optimisation des lois de commande a donc consisté à optimiser à chaque instant le fonctionnement des composants. Dans un premier temps, seul le moteur thermique a été considéré et l'optimisation a consisté à améliorer son rendement en modifiant ses points de

fonctionnement. Par la suite, la chaîne de traction entière a été prise en compte dans le rendement.

Pour améliorer ces méthodes, [Johnson-V, Wipke-K, Rausen-D, 2000] préconisent d'utiliser un critère plus riche que la consommation du moteur thermique en intégrant la recharge ou la décharge future de la batterie. En effet, si, à un instant donné, le véhicule décharge la batterie, il sera nécessaire ensuite de la recharger soit par freinage récupératif (coût gratuit), soit par le moteur thermique, ce qui entraînera une surconsommation. Il peut donc être intéressant, pour réguler l'état de charge de la batterie autour d'un seuil d'ajouter au critère à optimiser une composante liée à la variation d'état de charge de la batterie par l'intermédiaire de rendements moyens de charge et de décharge. L'article définit ainsi une consommation globale associant la consommation du moteur thermique à celle du moteur électrique et des batteries.

Cette optimisation a l'avantage de fournir une commande directement applicable dans le véhicule (commande en-ligne). Cependant, l'optimisation est seulement locale et elle ne permet pas de garantir que la stratégie obtenue fournit un bon résultat sur un cycle complet.

1.2 - Optimisation globale.

L'autre piste d'optimisation consiste à rechercher la meilleure stratégie possible pour un cycle donné. Ces méthodes d'optimisation globale nécessitent la formalisation du problème et sont dites hors-ligne puisque leur détermination utilise la connaissance du cycle a priori. La recherche de cette solution globale pour ce problème fortement non linéaire, souvent mal connu analytiquement et soumis à de nombreuses contraintes, implique la mise en place de méthodes numériques relativement lourdes. A titre d'exemple, on peut citer la programmation d'une méthode de recuit simulé dans [Delprat-S, Paganelli-G, Delhom-M, et al. 1999] ou d'algorithmes génétiques dans [Galdi-V, Ippolito-L, Vaccaro-A, 2001] ou encore la résolution de l'équation d'Hamilton-Jacobi-Bellman pour un système hybride dans [Méaude-N, 2001].

Les méthodes d'optimisation globale supposant que le cycle suivi est connu a priori, le passage de ces commandes hors-ligne à des commandes implémentables ne se fait pas directement. Il nécessite la transformation des résultats à une forme plus générale liée uniquement aux données disponibles à l'instant de calcul (avec perte d'optimalité) comme dans [Delprat-S, Guerra-TM, Rimoux-J, 2001] ou dans [Méaude-N, 2001]. Il s'agit généralement de chercher à stabiliser l'état de charge autour d'une valeur moyenne pour garantir le fonctionnement du véhicule quelles que soient les conditions de circulation ultérieures.

1.3 - La méthode retenue.

Le premier objectif de la thèse est de développer des lois de gestion d'énergie optimisant le fonctionnement du véhicule sur cycle et susceptibles d'être embarquées dans le véhicule. Nous nous sommes donc orientés vers

une simplification du problème d'optimisation pour permettre d'évaluer la consommation optimale sur cycle, tout en facilitant le passage de la commande hors-ligne à la commande embarquable. Plus précisément, le problème a été décrit en limitant le nombre de dynamiques pris en compte, et nous nous sommes intéressés plus à la caractérisation de la solution (c'est-à-dire à sa lisibilité) qu'à la précision de la solution obtenue. Notre choix s'est donc porté vers l'application du principe du maximum de Pontryaguine pour obtenir des conditions nécessaires d'optimalité, dont les développements font l'objet du reste de ce chapitre.

2 - Description du problème d'optimisation.

Comme le montre la Figure III.1, dans l'hybride série, nous pouvons distinguer trois groupes d'éléments :

- ∞ le générateur électrique, correspondant à la source d'énergie infinie,
- ∞ la batterie, la source finie,
- ∞ l'association des auxiliaires et du moteur électrique de traction, caractérisant la puissance électrique demandée.

Pour formaliser le problème d'optimisation, nous allons définir plus précisément les hypothèses prises pour la batterie et le générateur électrique.

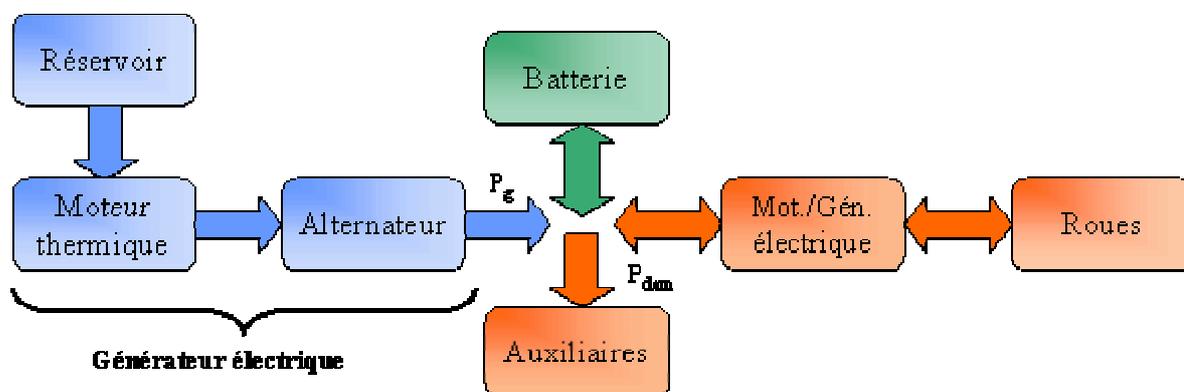


Figure III.1 - Architecture série.

2.1 - La batterie.

Le modèle de la batterie est celui défini dans le Chapitre II – 2.2, c'est-à-dire un modèle électrique composé d'une tension à vide E et d'une résistance interne R avec les mêmes hypothèses de sens de courant et de tension. On fait également l'hypothèse (raisonnable) que E et R ne dépendent pas de l'état de charge de la batterie dans sa plage d'utilisation correspondant à 20%-80% (cf. Figure II.5 et Figure II.6).

Avec ces hypothèses, la puissance P_b stockée ou déstockée de la batterie correspond à :

$$P_b = E.I \quad \text{équation III.1}$$

où $I > 0$ correspond à la décharge de la batterie et $I < 0$ à la recharge

En notant P , la puissance entrant dans la batterie, c'est-à-dire

$$P = (E - R.I).I \quad \text{équation III.2}$$

on obtient l'équation du second degré suivante :

$$R.I^2 - E.I + P = 0 \quad \text{équation III.3}$$

soit, en considérant la racine telle que $I(0) = 0$:

$$I = \frac{E}{2.R} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4.R.P}{E^2}} \right] \quad \text{équation III.4}$$

et

$$P_b(P) = \frac{E^2}{2.R} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4.R.P}{E^2}} \right] \quad \text{équation III.5}$$

Nous pouvons alors remarquer que ce modèle limite la puissance de décharge de la batterie à $\frac{E^2}{4.R}$ (terme sous la racine positif). Deux autres limitations de P , $P_{rechmax}$ ⁷ et $P_{déchmax}$, dites « continues » (cf. Chapitre II – 2.2.1), correspondant aux limitations de courant en charge et en décharge de la batterie, sont également à intégrer dans le problème.

2.2 - Le générateur électrique.

Le générateur électrique est vu comme une source d'énergie infinie et instantanée, ce qui signifie que la dynamique de changement de régime du moteur thermique n'est pas considérée ici. Toute puissance P_g de ce générateur comprise entre 0 et P_{gmax} peut donc être obtenue instantanément avec un coût en carburant $C(P_g)$ lié uniquement à la puissance fournie comme nous l'avons vu au Chapitre II – 2.1.2 :

$$C(P_g) = S(P_g).P_g \quad \text{équation III.6}$$

⁷ Avec les conventions de signe, $P_{rechmax} < 0$ et $P_{déchmax} > 0$.

où $S(P_g)$ est la consommation spécifique du générateur électrique tenant compte du rendement de l'alternateur (en g/kWh), connue sous forme de cartographie (Figure II.3).

2.3 - Formalisation du problème d'optimisation.

Reprenons le problème de l'hybride série de la Figure III.1. Il s'agit donc de minimiser la consommation sur un cycle :

$$\min_{P_g} \left(\int_{t_0}^{t_1} C(P_g) dt \right) \quad \text{équation III.7}$$

où $C(P_g)$ est la consommation instantanée du véhicule (équation III.6),

P_g est la puissance fournie par le générateur électrique

Cette minimisation doit être réalisée en respectant les contraintes des composants (et en particulier le modèle de la batterie) c'est-à-dire :

$$\dot{W} = P_b(P_{dem} - P_g) \quad \text{équation III.8}$$

$$\forall t \in [t_0, t_1], \quad P_g(t) \in [0, P_{gmax}] \quad \text{équation III.9}$$

$$\forall t \in [t_0, t_1], \quad (P_{dem}(t) - P_g(t)) \in [P_{rechmax}, P_{déchmax}] \quad \text{équation III.10}$$

$$\forall t \in [t_0, t_1], \quad W(t) \in [W_{min}, W_{max}] \quad \text{équation III.11}$$

où W est l'énergie stockée dans la batterie, $W(t_0) = W_0$ et $W(t_1) = W_1$,

W_{min} et W_{max} correspondent aux limites de la capacité de la batterie.

P_{dem} est la puissance électrique demandée totale (puissance demandée par les moteurs électriques pour la traction et puissance consommée par les auxiliaires).

Dans ce problème de commande optimale, l'énergie stockée dans la batterie W correspond à l'état du système, la puissance fournie par le générateur électrique P_g à la commande et la consommation totale au critère. La puissance demandée P_{dem} constitue une perturbation extérieure pour ce problème : pour toute valeur, imposée par le cycle suivi, la commande doit minimiser la consommation en choisissant P_g . En définitive, connaissant ce cycle, c'est-à-dire $P_{dem}(t)$, t_0 et t_1 , et l'énergie dans la batterie à l'instant initial et final (W_0 et W_1), on cherche la meilleure stratégie à appliquer (autrement dit le profil de puissance devant être fournie par le générateur électrique $P_g(t)$) pour minimiser la consommation de carburant sur le cycle.

3 - Application du principe du maximum.

Les principaux théorèmes du principe du maximum de Pontryaguine sont rappelés en annexe de ce mémoire et leurs démonstrations sont décrites précisément dans les trois ouvrages [Leitmann-G, 1966], [Pontryaguine-L, Boltianski-V, Gamkrelidze-R, et al., 1974] et [Athans-M, Falb-P, 1966]. Ce paragraphe va donc s'attacher à décrire leur application à l'hybride série et à mettre en évidence les résultats utilisables pour l'obtention de lois de gestion d'énergie embarquables.

3.1 - Application à l'hybride série.

Reprenons le problème défini dans le paragraphe précédent en supposant que les deux sources d'énergie, la batterie et le réservoir de carburant, sont infinies et sans contraintes de puissance fournie ou absorbée. Dans ces conditions, le problème se résume aux deux équations III.7 et III.8. Dans ce cas, il existe une fonction $K^*(t)$ vérifiant les relations suivantes :

$$\frac{dK^*}{dt} = -\frac{\partial(H)}{\partial W} \quad \text{équation III.12}$$

$$\max_{P_g} H[W^*(t), K^*(t), P_g] = H[W^*(t), K^*(t), P_g^*(t)] \quad \text{équation III.13}$$

où $H = -C(P_g) + K(t).P_b(P_{dem} - P_g)$ est l'Hamiltonien.

t_1 et W_1 étant connus, il n'y a pas d'autre équation.

H ne dépendant pas de W , l'équation III.12 devient

$$\frac{dK^*}{dt} = 0 \text{ soit } K^* = \text{constante} \quad \text{équation III.14}$$

Sur le cycle considéré, K^* ne dépend que des conditions initiale W_0 et finale W_1 considérées. De plus, pour toute puissance P_{dem} et pour une valeur de K donnée, on peut déterminer la puissance P_g qui maximise l'Hamiltonien, ce qui définit une fonction $M(K, P_{dem})$. On obtient ainsi une relation du type :

$$P_g^* = M(K, P_{dem}) \text{ tel que } \forall P_{dem}, \max_{P_g} H = -C(P_g^*) + K.P_b(P_{dem} - P_g^*) \quad \text{équation III.15}$$

3.2 - Prise en compte des contraintes sur la commande.

Les résultats du principe du maximum décrit ci-dessus restent valables si la commande appartient à un sous-ensemble de \mathfrak{X} , à condition que celui-ci soit fixé a priori, c'est-à-dire qu'il ne dépende ni du temps, ni de l'état de

ystème (l'état de charge de la batterie dans ce cas d'étude). En particulier, il est donc possible de prendre en compte des contraintes du type $P_g \in [0, P_{gmax}]$ (équation III.9) ou encore de limiter la puissance délivrée ou absorbée par la batterie, ce qui revient à écrire $P_g \in [P_{dem} - P_{déchmax}, P_{dem} - P_{rechmax}]$ (équation III.10).

3.2.1 - Résultats obtenus.

Dans ces conditions, on obtient des cartographies $P_g = M(K, P_{dem})$ du type de celle de la Figure III.2 :

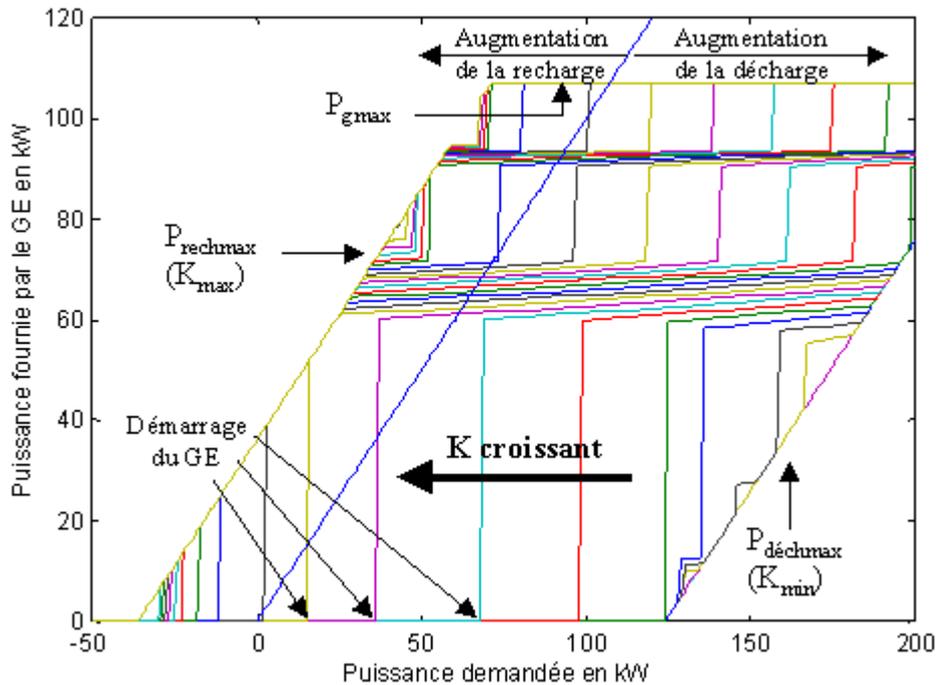


Figure III.2 - Exemple de cartographie de commande (courbes $K=constante$).

Sur la figure ci-dessus, la droite $P_g = P_{dem}$, représentant la situation où la puissance électrique demandée est entièrement fournie par le générateur électrique, permet d'interpréter le résultat de l'optimisation. A droite de cet axe ($P_g < P_{dem}$), la batterie est déchargée, alors qu'à gauche elle est rechargée. Les courbes les plus intéressantes sont donc celles qui coupent cette droite, puisque la commande peut, sur un même cycle, alterner les phases de charge et de décharge de la batterie.

3.2.2 - Interprétation physique de K^* .

Reprenons l'expression de l'Hamiltonien H en remplaçant $C(P_g)$ par sa décomposition en fonction de la consommation spécifique (équation II.6). On obtient :

$$H = -S(P_g).P_g + K.P_b(P_{dem} - P_g) \quad \text{équation III.16}$$

P_g étant la puissance fournie par la générateur électrique et $P_b(P_{dem} - P_g)$ celle stockée par la batterie (ou fournie par la batterie si $P_b(P_{dem} - P_g) < 0$), il apparaît, dans cette expression, que K est assimilable à une consommation spécifique. Plus précisément, K « affecte » une consommation spécifique en équivalent carburant (c'est-à-dire en g/kWh) à l'énergie électrique. Dans ces conditions, il est normal que l'optimum soit obtenu pour une valeur constante de K^* sur un cycle donné (résultat de l'équation III.4).

En définitive, l'optimisation va chercher à minimiser la consommation spécifique du générateur électrique. Pour cela, les points de fonctionnement du générateur électrique vont correspondre à des « zones » de consommation spécifique minimale. Nous pouvons vérifier ce phénomène en comparant les résultats de la cartographie de la Figure III.2 avec la consommation spécifique du générateur électrique de la Figure III.3. De plus, suivant la valeur donnée à K , l'utilisation de l'énergie de la batterie vis à vis de celle du carburant va être plus ou moins privilégiée. Par exemple, en affectant un coût élevé à l'énergie électrique (issue de la batterie), on va privilégier la recharge de la batterie et inversement si le coût de l'énergie de la batterie est faible vis à vis de celui du générateur électrique. La modification de la valeur de K va principalement influencer le seuil de démarrage/arrêt du générateur électrique et non sa plage de fonctionnement. Dans ces conditions, la consommation spécifique moyenne sur le cycle va peu varier. Par contre, la consommation totale va varier en fonction de l'énergie stockée ou déstockée sur le cycle.

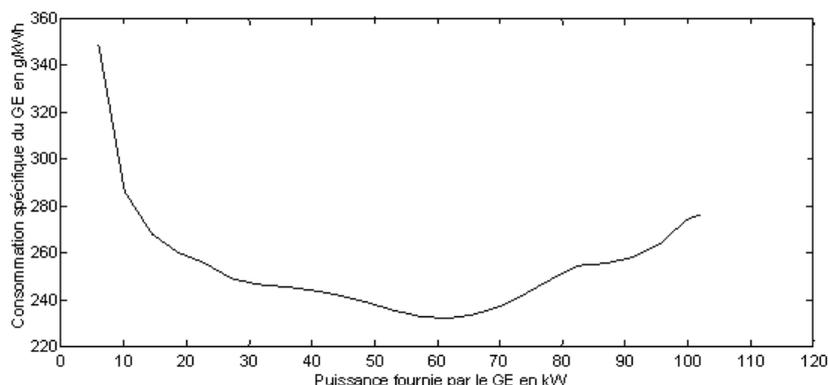


Figure III.3 – Consommation spécifique du générateur électrique.

3.2.3 - Détermination pratique de K^* .

En pratique, on cherche à déterminer la valeur de K qui correspond à la valeur souhaitée de $W_I - W_0$, le plus souvent correspondant à l'iso-état de charge (c'est-à-dire $W_I = W_0$). Cette valeur peut facilement être obtenue hors-ligne puisque la variation d'état de charge de la batterie est une fonction croissante de K (cartographie de la Figure III.2). Dans ces conditions, il suffit de réaliser une dichotomie sur K entre K_{min} (correspondant à la décharge maximale sur le cycle considéré) et K_{max} (recharge maximale).

3.3 - Prise en compte de contraintes sur l'état.

On souhaite, dans ce paragraphe, considérer l'équation III.11, correspondant aux limitations de l'état de charge de la batterie, autrement dit la prise en compte d'une source d'énergie non infinie. En effet, si l'espace d'état est un ouvert, alors le principe du maximum dans sa forme générale reste valable (en particulier tout ce qui a été décrit précédemment). Par contre, il n'est plus possible de l'appliquer si c'est un fermé et qu'une partie de la trajectoire est située sur le bord du domaine. L'application du principe du maximum restreint (description complète en annexe) fournit des éléments de réponse à ce nouveau problème : la recherche d'une commande optimale d'un véhicule hybride quand l'état de charge de sa batterie a atteint son niveau bas ou son niveau haut.

3.3.1 - Théorie.

On reprend le problème posé dans le paragraphe précédent. On souhaite donc trouver une commande admissible $P_g^*(t)$, minimisant $C_t = \int_{t_0}^{t_1} C(P_g) dt$ et vérifiant l'équation d'état $\dot{W} = P_b(P_{dem} - P_g)$ avec $W(t_0) = W_0$ et $W(t_1) = W_1$. De plus, on souhaite que $\forall t \in [t_0, t_1], W(t) \in [W_{min}, W_{max}]$.

Si $W \in]W_{min}, W_{max}[$, les résultats du paragraphe précédent restent valables et la commande obtenue est du type $P_g^* = M(K^*, P_{dem})$.

Supposons maintenant que l'état de charge a atteint son état haut, c'est-à-dire que :

$$g(W) = W - W_{max} = 0 \quad \text{équation III.17}$$

il en découle (recharge interdite)

$$\psi(P_g) = P_{dem} - P_g \leq 0 \quad \text{équation III.18}$$

Si le système reste sur la contrainte, alors on peut appliquer le principe du maximum restreint entre t_e , point d'entrée sur la contrainte et t_s , point de sortie. L'Hamiltonien est alors inchangé et il existe une fonction $K^*(t)$ telle que :

$$\begin{cases} \frac{dK^*}{dt} = -\frac{\partial(H)}{\partial W} + v_0(t) \frac{\partial \lambda}{\partial W} \\ \max_{P_g \in \Omega} H[W^*(t), K^*(t), P_g] = H[W^*(t), K^*(t), P_g^*(t)] \text{ avec } \Omega = \{P_g / \lambda = 0\} \\ H[W^*(t), K^*(t), P_g^*(t)] = 0 \end{cases}$$

$$\text{équation III.19}$$

où $H = -C(P_g) + K.P_b(P_{dem} - P_g)$

$$\begin{aligned}\lambda &= \left\langle \frac{dg}{dW}, P_b(P_{dem} - P_g) \right\rangle \\ &= P_b(P_{dem} - P_g)\end{aligned}$$

Le système d'équation devient :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dK^*}{dt} &= -\frac{\partial(-C(P_g^*) + K^* P_b(P_{dem} - P_g^*))}{\partial W} + v_0(t) \frac{\partial(P_b(P_{dem} - P_g^*))}{\partial W} \\ \max_{u \in \Omega} H &= H^* \quad \text{et} \quad \Omega = \{P_g / P_b(P_{dem} - P_g) = 0\} \\ -C(P_g^*) + K^* P_b(P_{dem} - P_g^*) &= 0 \end{aligned} \right. \quad \text{équation III.20}$$

soit :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dK^*}{dt} &= 0, \quad K^* = \text{constante} \\ P_g^* &= P_{dem} \\ C(P_g^*) &= 0, \quad P_g^* = 0 \end{aligned} \right. \quad \text{équation III.21}$$

Le système ne peut donc pas rester sur la contrainte, sauf si $P_{dem} = 0$. Il ne peut l'atteindre qu'en des points isolés où il se produit une discontinuité de K^* donnée par la condition de saut avec $t_e = t_s = t_d$:

$$K^*(t_d - 0) < K^*(t_d + 0)$$

Si on considère le niveau bas d'état de charge de la batterie, on inverse l'inégalité ci-dessus.

3.3.2 - Conclusion.

En définitive, tant que l'état de charge de la batterie n'a pas atteint sa limite haute ou basse, le principe du maximum dans sa forme générale reste toujours valable. On a également démontré que le fonctionnement consistant à rester sur une contrainte (c'est-à-dire du type $P_g^* = P_{dem}$) est sous-optimal. Par contre, il est possible d'atteindre les limites inférieures ou supérieures en des points isolés où il se produit une discontinuité du paramètre K . Avec la prise en compte de contraintes sur l'état de charge de la batterie, K n'est plus constant sur le cycle considéré, mais constant par morceaux. De plus, au point t_d de discontinuité, on a $K^*(t_d - 0) < K^*(t_d + 0)$ ⁸ si le niveau haut a été atteint et $K^*(t_d - 0) > K^*(t_d + 0)$ pour le niveau bas.

⁸ $K^*(t_d - 0)$ correspond à la valeur de K^* à gauche et $K^*(t_d + 0)$ celle à droite.

3.3.3 - Mise en œuvre.

En pratique, l'augmentation de K^* correspondant à une charge plus importante de la batterie, la contrainte haute n'est atteinte que dans les points t_d d'état de charge maximal hors contrainte $K^*(t_d - 0) < K^*_{\text{sans contraintes}} < K^*(t_d + 0)$ (et inversement pour la contrainte basse). Pour transformer une commande obtenue sans contraintes en une commande prenant en compte des limitations d'état de charge de la batterie, il suffit de décomposer le problème en sous-problèmes.

Plus précisément, la première étape (Figure III.4) consiste à résoudre le problème sans contraintes d'état de charge. On obtient ainsi pour le cycle considéré une valeur de paramètre K^* et un profil d'état de charge optimal.

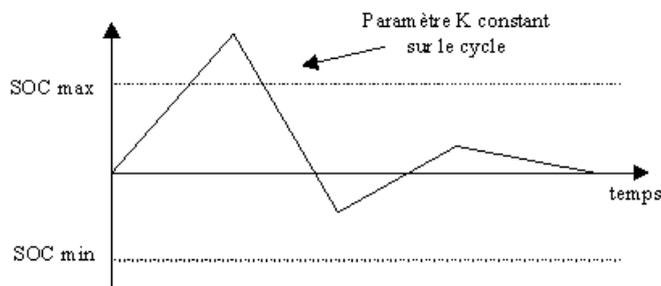


Figure III.4 - Etape 1 : résolution sans contraintes d'état de charge.

Dans l'exemple proposé, le profil obtenu ne respecte pas la limitation haute d'état de charge de la batterie ; le problème initial va donc être transformé en deux sous-problèmes. La limitation haute va être atteinte au point d'état de charge maximal hors contrainte (Figure III.5).

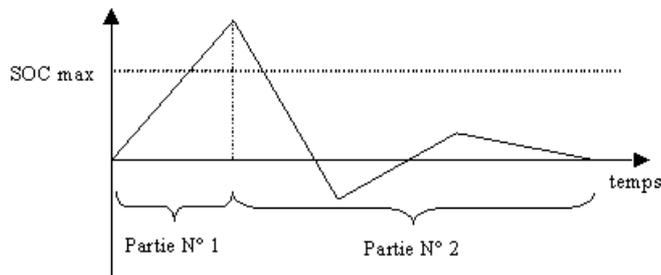


Figure III.5 - Etape 2 : décomposition en sous-problèmes.

Il suffit ensuite de résoudre les deux problèmes avec les nouvelles conditions finale pour la partie 1 et initiale pour la partie 2, ce qui correspond à deux valeurs distinctes de K (Figure III.6).

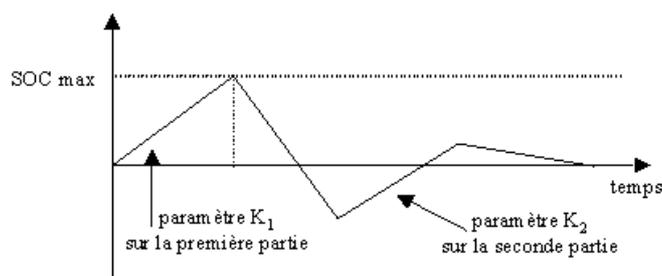


Figure III.6 - Etape 3 : résolution des sous-problèmes.

Il peut alors être nécessaire pour la résolution d'un sous-problème de reprendre ses trois étapes si le profil d'état de charge obtenu franchit de nouveau les limitations d'état de charge.

Ce paragraphe nous a donc fourni une solution au problème d'optimisation de la consommation sur cycles d'un véhicule électrique hybride série. La méthode est facilement généralisable à d'autres architectures ; par contre, elle ne fournit pas directement une solution au problème de la réalisation d'une commande embarquée.

4 - Passage d'une conception hors-ligne à une commande embarquée.

Nous disposons maintenant d'une commande qui, connaissant la puissance électrique totale demandée et la valeur d'un paramètre K , nous fournit la commande du véhicule hybride, c'est-à-dire l'éventuel démarrage/arrêt du moteur thermique et son point de fonctionnement s'il est démarré. En effet, la cartographie de la Figure III.2 nous fournit la puissance du générateur électrique qui est ensuite décomposée en couple et régime optimaux selon l'équation II.2. Par contre, cette commande pose deux problèmes pour l'embarquer dans un véhicule. D'une part, le seul critère pris en compte dans le problème d'optimisation est la consommation sur cycle du véhicule. Dans ce cas, le confort du conducteur n'intervient que sous la forme de la satisfaction de la puissance demandée. Ceci n'est pas suffisant pour rendre les lois développées acceptables pour un conducteur de véhicule conventionnel. D'autre part, la valeur de K est a priori inconnue, puisque sa détermination nécessite la connaissance du cycle suivi (obtention par dichotomie). Ces deux points vont être évoqués dans les paragraphes suivants pour aboutir à des lois de gestion d'énergie embarquables dans un véhicule.

4.1 - Prise en compte du confort du conducteur.

Le test des lois de commande issues directement des résultats de l'optimisation sur un profil réaliste de roulage fournit des démarrages/arrêts du moteur thermique incessants. En effet, l'optimisation préconise d'utiliser un seuil de puissance électrique demandée (à la fois par les auxiliaires et les moteurs électriques) pour le démarrage/arrêt du générateur électrique. Cependant, comme le montre la Figure III.7, cette puissance varie très brutalement et rend inefficace l'utilisation d'une hystérésis classiquement ajoutée dans les lois de gestion d'énergie pour diminuer le nombre des commutations du moteur thermique. Nous avons donc cherché d'autres moyens pour diminuer ce nombre. Il est à noter que, sur la Figure III.7, les puissances négatives correspondent aux phases de freinage récupératif (recharge gratuite de la batterie).

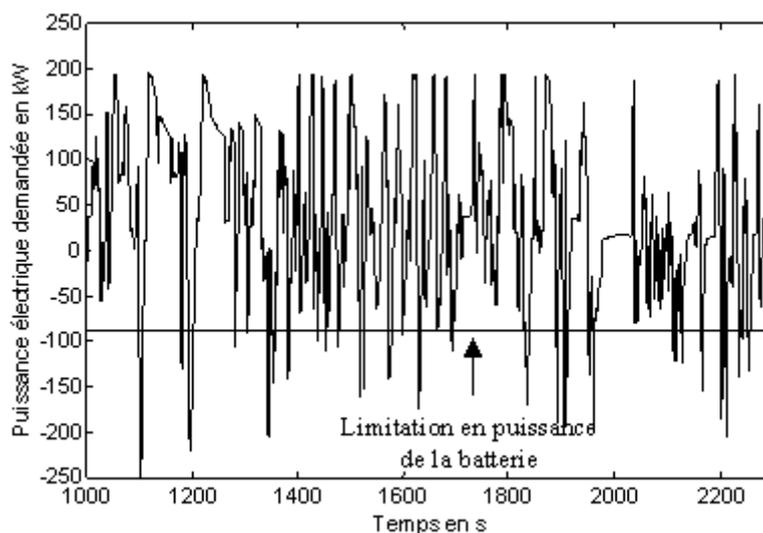


Figure III.7 – Exemple de profil de puissance électrique demandée.

Pour diminuer le nombre de démarrages/arrêts jugés intempestifs par un conducteur, des lois spécifiques dites de « confort » ont été implantées. A titre d'exemple, il s'agit d'interdire l'arrêt du moteur thermique si celui-ci est en fonctionnement depuis moins de n secondes⁹. Il est également possible d'utiliser une puissance demandée filtrée plutôt que la puissance brute à l'entrée des cartographies de commande pour atténuer l'impact des pics de puissance demandée. Ces lois, dont le choix a été effectué en fonction de leur impact en terme de consommation, ont permis de diminuer notablement le nombre de démarrage/arrêt (cf. Figure III.8 et Figure III.9).

⁹ $n=3$ dans notre application.

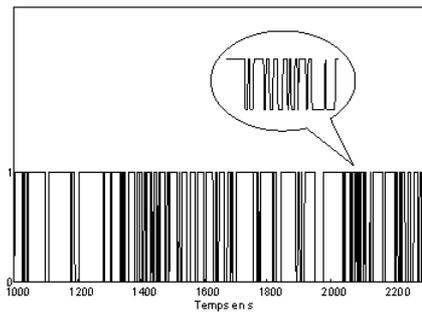


Figure III.8 – Démarrages/arrêts du moteur thermique préconisés par la méthode d'optimisation.

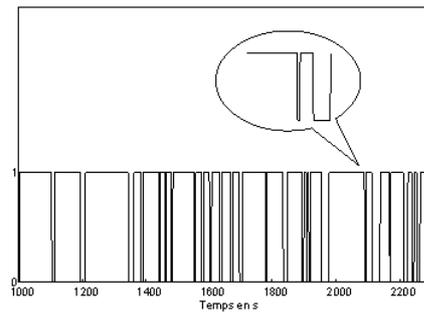


Figure III.9 – Démarrages/arrêts du moteur thermique après l'introduction des lois de confort.

Le travail sur l'ajout de lois de confort a uniquement été effectué du point de vue du nombre de démarrage/arrêt du moteur thermique. Bien évidemment, si un prototype avait été disponible, il aurait certainement été nécessaire d'ajouter d'autres lois garantissant un ressenti du conducteur (et des passagers dans le cadre du bus) acceptable et au moins comparable à celui d'un véhicule conventionnel. On peut citer l'interdiction de certains modes, tels que la recharge de la batterie à très faible vitesse, pour des raisons acoustiques ou l'utilisation de lois spécifiques n'optimisant pas la consommation lors de très fortes demandes c'est-à-dire lors d'un pied à fond sur la pédale d'accélérateur.

4.2 - Détermination du K en-ligne.

L'optimisation des lois de gestion d'énergie par le principe du maximum permet d'obtenir des cartographies de commande, mais ne nous fournit pas la valeur numérique de K_{iso} , valeur de K correspondant à un fonctionnement à iso-état de charge sur le cycle considéré. Celle-ci peut être trouvée numériquement hors-ligne par dichotomie de l'espace des K , mais cette technique n'est cependant pas implantable en ligne.

Une solution consiste à faire évoluer le paramètre K en fonction de l'état de charge de la batterie pour permettre le fonctionnement du véhicule dans une plage « acceptable » d'état de charge de la batterie. En effet, une augmentation de K favorisera la recharge de la batterie et une diminution de K , sa décharge (cartographie de la Figure III.2). Ainsi, en appliquant une fonction décroissante de l'état de charge de la batterie pour obtenir la valeur de K , il sera possible de stabiliser cet état de charge dans quasiment tous les cas de figure et permettre l'utilisation de tous les modes de fonctionnement à tout moment (freinage récupératif, boost électrique,...). Par contre, ce phénomène peut limiter fortement l'utilisation de la batterie, ce qui a tendance à pénaliser la consommation du véhicule : le passage de K^* constant à K variable est sous-optimal.

4.3 - Impact en terme de consommation.

Comme l'explique [Brunner-H, Winger-A, 1999], les lois de gestion d'énergie doivent en fait à la fois minimiser la consommation d'énergie et maximiser le confort de conduite, deux phénomènes dont les actions sont le plus souvent opposées. Nous avons ainsi choisi de simplifier le problème d'optimisation initial pour faciliter le passage de la conception hors-ligne à la commande embarquée et d'ajouter ensuite des lois expertes pour assurer le confort de conduite. Cependant, nous savons que ces lois peuvent dégrader la consommation du véhicule. Il est donc nécessaire d'évaluer leur impact, ce qui est l'objet des paragraphes qui suivent.

4.3.1 - Validité de la consommation pour un véhicule hybride.

Pour un véhicule conventionnel ou un véhicule électrique, l'obtention de la consommation consiste à faire parcourir le cycle au véhicule et à mesurer les variations de sa source d'énergie respectivement en l/100 km et kWh/km. Pour un véhicule hybride, dont les lois de gestion d'énergie cherchent à maintenir l'état de charge de la batterie, la mesure de la consommation de la source d'énergie principale (le carburant) est une mauvaise représentation de sa consommation sur cycles, puisqu'il existe tout de même des variations d'état de charge à la fin du cycle (cf. Figure I.11). Deux méthodes sont alors envisageables pour définir la consommation du véhicule hybride : soit essayer d'obtenir précisément l'iso-état de charge sur le cycle, soit définir une consommation spécifique pour les hybrides.

4.3.2 - Solutions envisagées.

[Morita-K, Shimamura-K, Iwai-N, et al., 2001] proposent différentes techniques permettant d'évaluer la consommation d'un véhicule hybride en se rapprochant d'un fonctionnement à iso-état de charge, dont les deux plus classiques, la répétition du cycle et l'approximation linéaire, vont être détaillés ci-dessous.

Avec les lois de gestion d'énergie cherchant à maintenir l'état de charge de la batterie, un comportement périodique de cet état de charge peut être observé sur une répétition d'un même cycle, comme on peut le voir sur la Figure III.10. Il en découle naturellement une technique d'estimation de la consommation asymptotique du véhicule, en considérant la consommation moyenne à iso-état de charge. Par contre, le nombre de cycles à réaliser pour obtenir cette consommation asymptotique n'est pas connu a priori et la convergence est obtenue pour un état de charge initial sur le cycle non maîtrisé. De plus, l'iso-état de charge est obtenu pour une période correspondant à un nombre entier de fois d'exécution du cycle qui n'est pas forcément égal à 1. Cette méthode nécessite donc souvent un grand nombre de calculs pour une application en simulation.

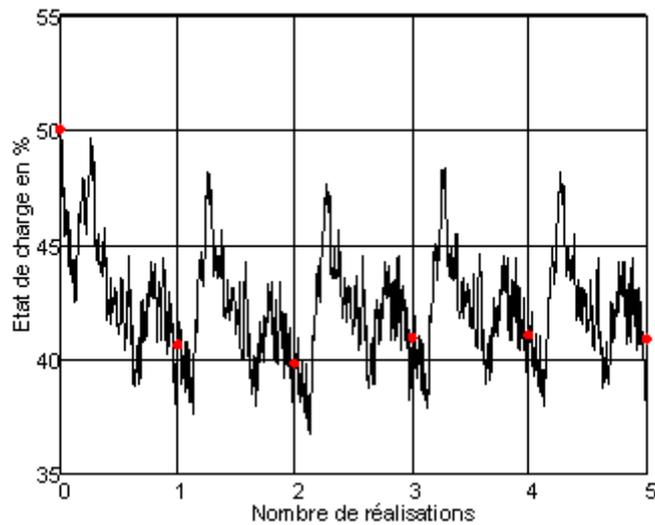


Figure III.10 – Variation de l'état de charge de la batterie au cours de la répétition d'un même cycle.

Une seconde technique consiste à tracer la consommation de carburant du véhicule en fonction de la variation d'état de charge de la batterie sur le cycle. Ensuite, par approximation linéaire, on peut évaluer la consommation correspondant à l'iso-état de charge.

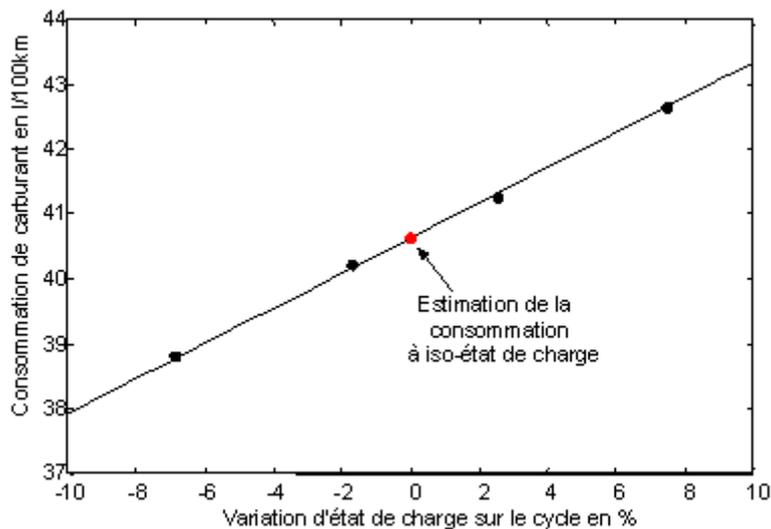


Figure III.11 – Estimation de la consommation par régression linéaire.

Ces techniques fournissent de bons résultats pour l'évaluation de la consommation du véhicule hybride sans variation d'état de charge de la batterie. Par contre, elles nécessitent plusieurs exécutions d'un même cycle, ce qui peut fortement augmenter le temps des calculs, c'est pourquoi nous avons cherché à utiliser un autre critère que la consommation brute de carburant, nommée « consommation corrigée ».

4.3.3 - Présentation de la consommation corrigée.

L'objectif de la consommation dite corrigée est de prendre en compte, dans la consommation du véhicule, la variation d'état de charge de la batterie. Pour cela, il faut évaluer cette variation de SOC en équivalent carburant. Plus précisément, on obtient l'équation suivante :

si $\Delta SOC > 0$

$$Conso_cor = Conso_brute - CSM * E_{bat} * \Delta SOC * \rho_{decharge}$$

si $\Delta SOC < 0$

$$Conso_cor = Conso_brute - \frac{CSM * E_{bat} * \Delta SOC}{\rho_{recharge}}$$

équation III.22

où $Conso_brute$ est la consommation du véhicule en l/100km

CSM est la consommation spécifique moyenne du véhicule sur le cycle en l/kWh

E_{bat} est la quantité d'énergie de la batterie en kWh

ΔSOC est la variation d'état de charge de la batterie sur le cycle

$\rho_{decharge}$ est le rendement moyen de décharge de la batterie

$\rho_{recharge}$ est le rendement moyen de recharge de la batterie

La consommation corrigée suppose de connaître précisément le rendement de charge ou de décharge de la batterie sur le cycle considéré, ce qui ne sera pas le cas si les lois de gestion d'énergie ne font que charger (ou décharger) la batterie sur ce cycle. En effet, le rendement de décharge (ou de charge) ne pourra être évalué que sur de très faibles zones du cycle et ne sera certainement pas représentatif. Cette consommation ne sera donc valable que pour de faibles variations d'énergie batterie.

4.3.4 - Résultats obtenus.

Nous allons évaluer l'apport de l'optimisation dans les lois de gestion d'énergie et l'impact des lois de confort et du passage en-ligne à la fois en termes de consommation et de nombre moyen de démarrage-arrêt du moteur thermique. Pour cela, différentes lois de gestion d'énergie ont été comparées :

☞ les lois dites « classiques » réalisent le démarrage-arrêt du moteur thermique sur deux seuils d'état de charge de la batterie et optimisent uniquement le moteur thermique en le plaçant à son meilleur point de fonctionnement ;

☞ les lois hors-lignes théoriques utilisent les algorithmes issus de l'application du principe du maximum, c'est-à-dire qu'ils recherchent la valeur de K (notée K_{iso}) correspondant à l'iso-état de charge sur les modèles simplifiés des composants;

∞ les lois hors-ligne simulées recherchent la valeur de ce K_{iso} en simulation pour évaluer l'impact des transitoires négligés en terme de consommation ;

∞ des lois de confort ont ensuite été ajoutées à la gestion d'énergie précédente ;

∞ enfin, une méthode en-ligne a été évaluée en utilisant pour K une fonction de l'état de charge de la batterie semblable à celle de la Figure III.12.

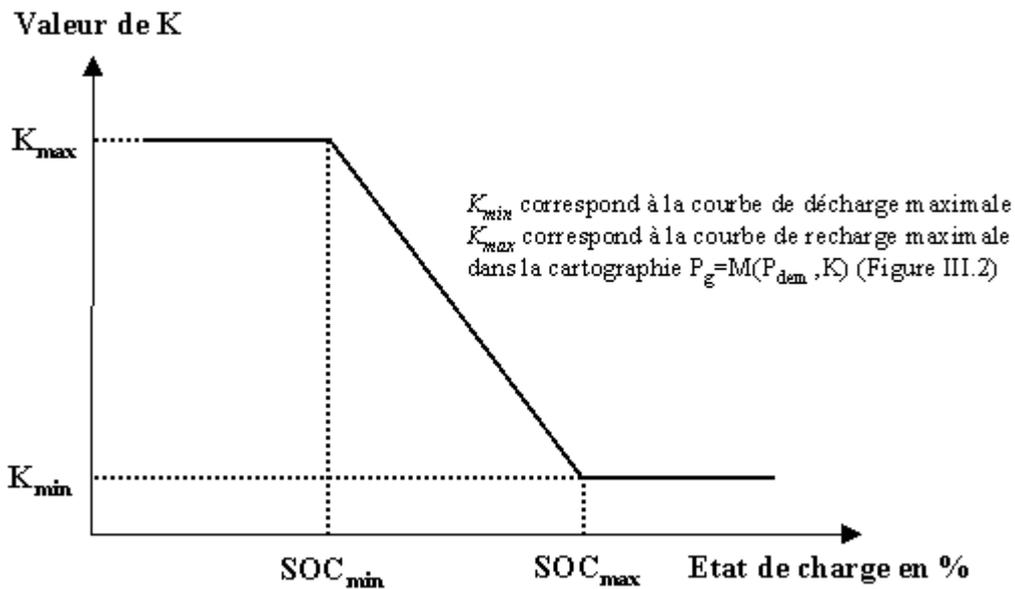


Figure III.12 – Exemple de fonction utilisée dans une application en-ligne des résultats théoriques.

Les résultats obtenus pour plusieurs cycles, provenant d'enregistrements réalisés durant l'été 2000, sont regroupés dans le Tableau III.1. La méthode classique permet un nombre de démarrage/arrêt du moteur thermique très faible. Par contre, elle n'optimise que le fonctionnement du moteur thermique. Comme le montre cette étude, la commande optimale permet d'améliorer notablement la consommation du véhicule en prenant en compte le système complet dans l'optimisation. Ainsi, l'optimisation des lois de gestion d'énergie par application du principe du maximum de Pontryaguine, permet, en théorie, un gain de 7 à 10 l/100km vis-à-vis des lois de gestion d'énergie classiques. Cependant, 1 à 2 l/100km sont dus à la simplification extrême utilisée dans les modèles et ne correspondent donc pas à un gain réaliste. De plus, en introduisant un démarrage/arrêt du moteur thermique sur un seuil de puissance demandée, elle entraîne un nombre de commutations de celui-ci important. Ces résultats « bruts », introduisant en moyenne un démarrage ou un arrêt toutes les 10 à 12 secondes, ne sont pas acceptables pour le conducteur. Il a donc été nécessaire d'ajouter des lois dites de « confort » qui réduisent fortement le nombre de démarrage/arrêt tout

en ne pénalisant pas trop la consommation : la surconsommation introduite, de l'ordre de 0,2 à 0,5 l/100km, est très inférieure à la surconsommation obtenue par la prise en compte des transitoires. Enfin, les lois de commande embarquables issues de l'optimisation représentent une dégradation supplémentaire de 0,5 à 1 l/100km.

Lois de gestion d'énergie	Cycle utilisé							
	QR1	QR2	QR3	QR4	RQ2	RQ3	RQ4	RQ5
LGE « classiques »	45,1 l/100km	47,0 l/100km	39,7 l/100km	49,3 l/100km	56,4 l/100km	55,3 l/100km	54,3 l/100km	55,1 l/100km
	0,3 com./mn	0,2 com./mn	0,4 com./mn	0,2 com./mn	0,3 com./mn	0,2 com./mn	0,1 com./mn	0,2 com./mn
LGE hors-ligne théoriques	38,3 l/100km	38,7 l/100km	33,6 l/100km	39,5 l/100km	49,2 l/100km	48,2 l/100km	47,5 l/100km	48,4 l/100km
	7,2 com./mn	5,0 com./mn	7,8 com./mn	6,2 com./mn	4,8 com./mn	5,2 com./mn	6,2 com./mn	6,5 com./mn
LGE hors-ligne simulées	39,6 l/100km	40,1 l/100km	35,0 l/100km	41,5 l/100km	50,7 l/100km	49,3 l/100km	49,0 l/100km	49,8 l/100km
	6,6 com./mn	5,0 com./mn	7,1 com./mn	5,8 com./mn	4,3 com./mn	4,9 com./mn	6,1 com./mn	4,6 com./mn
LGE hors-ligne avec lois de confort	39,9 l/100km	40,6 l/100km	35,3 l/100km	41,9 l/100km	51,0 l/100km	49,5 l/100km	49,2 l/100km	49,9 l/100km
	2,7 com./mn	2,5 com./mn	2,5 com./mn	2,5 com./mn	1,8 com./mn	1,7 com./mn	1,4 com./mn	1,5 com./mn
LGE en-ligne	40,5 l/100km	41,4 l/100km	35,5 l/100km	42,9 l/100km	51,8 l/100km	50,0 l/100km	49,9 l/100km	51,0 l/100km
	3,0 com./mn	2,4 com./mn	2,6 com./mn	2,9 com./mn	3,0 com./mn	2,2 com./mn	2,2 com./mn	2,6 com./mn

Tableau III.1 - Impact des lois de gestion sur la consommation du véhicule et le nombre moyen de commutations du moteur thermique.

En définitive, la réalisation de lois de gestion d'énergie embarquées et basées sur l'optimisation du système complet permet un gain moyen de consommation de 10%. Par contre, il existe encore un gain supplémentaire de 1 à 2% qui peut être obtenu par une meilleure gestion de l'état de charge de la batterie avec la prise en compte du cycle suivi.

5 - Conclusion.

Ce chapitre a présenté une méthodologie de développement de lois de gestion d'énergie implantables dans un véhicule hybride. Plus précisément, la méthode consiste à formaliser le problème d'optimisation de la consommation sur cycle du véhicule, à l'aide de modèles simplifiés de chaque composant. En particulier, la batterie n'est représentée que par une tension à vide et une résistance interne constantes et le moteur thermique ne comprend qu'une

simple cartographie de consommation obtenue en fonctionnement stabilisé. Il est alors possible d'appliquer les résultats du principe du maximum de Pontryaguine et d'obtenir une solution au problème d'optimisation ne dépendant que d'un unique paramètre noté K . Le passage de cette conception hors-ligne à une commande embarquée est alors simplifié, puisqu'un fonctionnement stabilisant l'état de charge de la batterie autour d'une valeur moyenne peut très facilement être obtenu à partir de la détermination de ce paramètre K . De même, des lois permettant d'assurer un confort de conduite comparable à celui d'un véhicule conventionnel peuvent être ajoutées a posteriori sans difficultés.

Une application complète de cette méthodologie a été réalisée sur le bus de type hybride série décrit dans le chapitre précédent. Un gain de consommation de l'ordre de 10% a été obtenu vis à vis des lois de gestion d'énergie n'optimisant que le seul moteur thermique. De plus, il est apparu un potentiel de gain supplémentaire de 1 à 2%, pouvant être obtenu par la prise en compte du cycle suivi et une meilleure gestion de l'état de charge de la batterie.

Chapitre IV - ADAPTATION DES LOIS DE GESTION D'ENERGIE AU PARCOURS EFFECTUE.

Ce chapitre propose un développement de lois de gestion d'énergie s'adaptant au trajet effectué, par l'intermédiaire de l'apprentissage de l'état de charge de la batterie. La méthode se décompose en trois niveaux intervenant à des périodes d'échantillonnage très différentes.

Le premier niveau, correspondant à la commande instantanée du véhicule, détermine le démarrage/arrêt du moteur thermique et son point de fonctionnement. Il est issu du chapitre précédent et ne dépend que d'un unique paramètre K .

Le dernier niveau, l'apprentissage, cherche à optimiser la consommation du véhicule sur le trajet suivi. Il se décompose en plusieurs parties : la reconnaissance du trajet a priori, la détermination du profil d'état de charge à suivre, l'évaluation de la réalisation, puis son éventuelle intégration dans les connaissances acquises sur ce trajet.

Enfin, la supervision locale réalise le lien entre les deux niveaux précédents en modifiant la valeur du paramètre K pour faire suivre à la batterie un profil d'état de charge désiré SOC*. Elle s'effectue tous les 5 à 10s pour vérifier en quelques points de contrôle que le profil d'état de charge désiré est bien celui suivi.

Dans les lois de gestion d'énergie, ne disposant pas de connaissance a priori sur le trajet effectué par le véhicule, des règles supplémentaires sur l'état de charge de la batterie sont généralement introduites pour garantir le fonctionnement du véhicule dans tous les cas de figure. Le plus souvent, elles vont entraîner une régulation de l'état de charge de la batterie autour d'une valeur moyenne pour pouvoir stocker ou déstocker de l'énergie dans tous les cas. Cette stratégie peut malheureusement être mise en défaut, puisque les états de forte charge ou de forte décharge peuvent aussi constituer de bonnes solutions pour un cycle donné. Dans l'exemple de la Figure IV.1 issue du brevet [Hisada-H, Moroto-S, 1998], après la zone ② de forte décharge de la batterie, la stratégie en-ligne va avoir tendance à charger la batterie dès qu'elle le peut, c'est-à-dire dans la zone suivante ③. Même si le véhicule utilise les meilleurs rendements de sa chaîne de traction pour charger sa batterie, cette solution ne sera pas la meilleure stratégie si un peu plus loin dans le cycle, il existe une zone de forte décélération (zone ④) qui permettrait au véhicule de recharger la batterie gratuitement par freinage récupératif. Dans ce cas-ci, il est préférable de rester à un état de charge bas et d'attendre pour recharger la batterie. Pour améliorer les résultats des lois de gestion d'énergie en-ligne, il apparaît donc essentiel de prendre en compte des informations sur le cycle suivi. Des informations de nature instantanée telle que le type de route suivi (autoroutier, routier, urbain...) ne sont pas suffisantes, puisqu'elles ne peuvent caractériser le trajet réellement suivi en entier (par exemple, la succession des types de route).

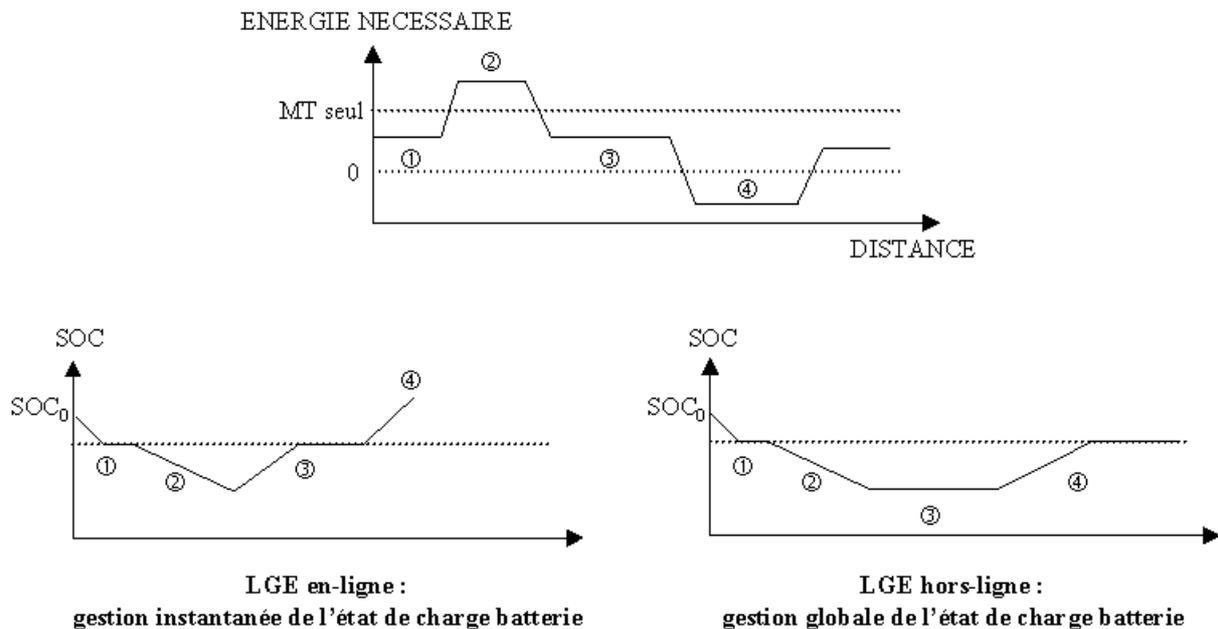


Figure IV.1 – Gestion de l'état de charge de la batterie pour différents types de lois de gestion de l'énergie.

L'état de charge de la batterie, caractérisant parfaitement le fonctionnement du véhicule sur de longues périodes temporelles, apparaît comme une variable essentielle des lois de gestion d'énergie. En effet, une meilleure utilisation du véhicule hybride sera obtenue s'il est possible de prendre en compte l'itinéraire à parcourir (conditions de circulation,

dénivellation, consommation des auxiliaires,...) afin d'optimiser l'emploi de la batterie et de se rapprocher des résultats obtenus hors-ligne. Une solution consistant à prendre en compte le parcours suivi va donc être développée dans ce chapitre.

1 - L'organisation proposée.

Nous proposons une méthodologie de construction de lois de gestion d'énergie adaptatives, c'est-à-dire prenant en compte le trajet suivi, basée sur la gestion de l'état de charge de la batterie. Comme la Figure IV.1 le décrit, la commande est basée sur le développement de trois niveaux :

- ∞ la commande instantanée du véhicule,
- ∞ la supervision locale,
- ∞ l'apprentissage du trajet suivi.

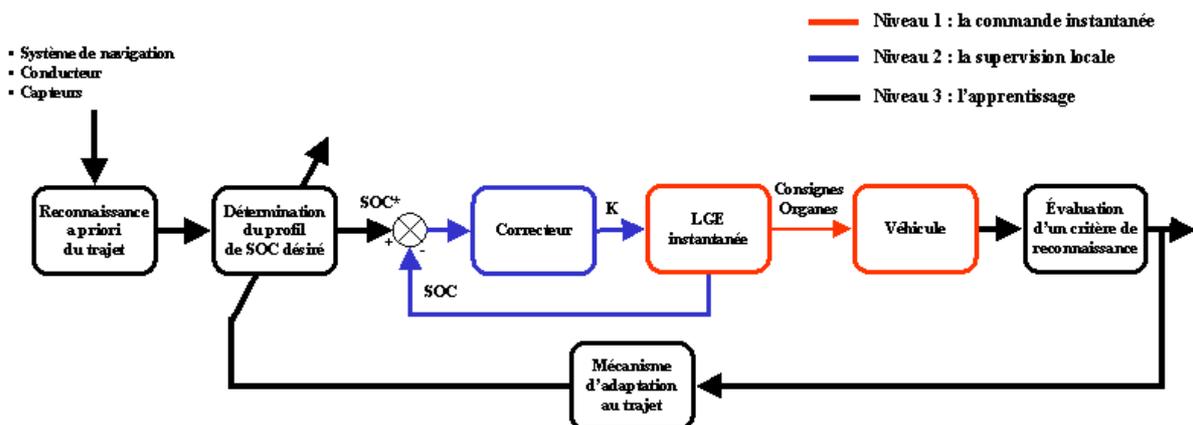


Figure IV.2 – Organisation de la commande du véhicule hybride.

Ce paragraphe va décrire l'organisation générale de la commande proposée et sa réalisation sur l'application considérée.

1.1 - Le niveau instantané.

Le niveau instantané correspond au plus bas niveau des lois de gestion d'énergie proposées, fournissant, toutes les 0,01 à 0,1s, les consignes de répartition des flux d'énergie entre les deux sources à appliquer au véhicule.

Dans ce premier niveau, on peut distinguer les lois :

- ∞ permettant le démarrage/arrêt du moteur thermique (hystérésis de vitesse, de couple, de puissance...),
- ∞ assurant la régulation du fonctionnement de ce dernier lorsqu'il est démarré (optimisation du fonctionnement de la chaîne de traction),
- ∞ assurant le respect des limitations des composants¹⁰ (interdiction de la recharge si la batterie a atteint un seuil haut ou de la décharge pour un seuil bas...),
- ∞ ajoutées pour le confort du conducteur ou la fiabilité de la chaîne de traction (temps minimal avant le redémarrage du moteur thermique...).

En règle générale, les lois permettant le démarrage/arrêt du moteur thermique et la détermination des points de fonctionnement des composants sont paramétrées pour permettre l'ajustement de l'état de charge de la batterie suivant un profil désiré. Ce vecteur de paramètres a une structure figée a priori par l'expérience. Pour cette application, ce premier niveau correspond aux lois de gestion d'énergie développées dans le chapitre précédent et issues de l'application du principe du maximum de Pontryaguine. Dans ce cas, le paramétrage des lois se résume à la variable K .

1.2 - Le niveau d'apprentissage.

Le dernier niveau de commande est le niveau d'apprentissage du trajet suivi. Il peut être vu comme la version embarquée des lois globales d'optimisation, ce qui implique que les calculs réalisés hors-ligne (c'est-à-dire avant ou après l'exécution du trajet) ne doivent pas nécessiter un temps et une place mémoire trop importants. Aussi est-il préférable d'optimiser un modèle simple du véhicule avec un nombre de contraintes limitées, plutôt que de mettre en place une méthode de commande optimale plus précise mais très lourde. Les résultats du principe du maximum de Pontryaguine dans sa version hors-ligne semblent donc bien adaptés pour traiter cette phase. Cependant, pour obtenir le profil d'état de charge désiré, il faut disposer du profil de puissance demandée caractérisant complètement le trajet effectué, ce qui est l'objectif de la première phase de ce niveau. Ensuite, après la réalisation du trajet, il faut évaluer sa reproductibilité pour savoir s'il est intéressant ou pas d'intégrer ces nouvelles connaissances aux connaissances déjà acquises.

1.3 - Le niveau de supervision locale.

Pour réaliser le lien entre les deux niveaux précédents, c'est-à-dire entre les lois instantanées et l'apprentissage, un niveau de supervision locale

¹⁰ Ces lois correspondent à un mode dégradé de la gestion générale de l'énergie dans le véhicule hybride.

ou module de « suivi de SOC » doit être intégré. Il s'agit de modifier la valeur du (ou des) paramètre(s) des lois de commande instantanées (bleu) pour faire suivre à la batterie un profil d'état de charge désiré SOC* (noir). Cette supervision locale s'effectue toutes les 5 à 10s pour vérifier en quelques points de contrôle que le profil d'état de charge désiré est bien suivi. En définitive, ce niveau de supervision locale remplace la courbe de la Figure III.12, fournissant la valeur du paramètre K en fonction de l'état de charge de la batterie, par un asservissement de cet état de charge.

Les trois niveaux décrits succinctement ci-dessus vont être développés dans la suite de ce chapitre. Mais avant de préciser la réalisation de ces lois de gestion d'énergie s'adaptant au trajet suivi, il est nécessaire de vérifier qu'il existe une reproductibilité suffisante des profils optimaux d'état de charge de la batterie. Ce point est l'objet du prochain paragraphe.

2 - Reproductibilité des cycles.

Nous avons choisi de développer des lois de gestion d'énergie adaptatives autour de la gestion de l'état de charge de la batterie, qui apparaît comme l'élément essentiel du véhicule hybride. La méthode proposée suppose qu'il existe une certaine reproductibilité des cycles correspondant à un même trajet. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons mesuré la vitesse d'un bus sur une ligne (l'aller correspond au trajet N°1 et le retour au trajet N°2) en le suivant avec un prototype de véhicule électrique instrumenté. Nous avons ensuite déterminé les profils d'état de charge théorique correspondant à l'application d'une valeur de K constante sur le cycle. Les résultats obtenus sont visualisés sur la Figure IV.3 et la Figure IV.4.

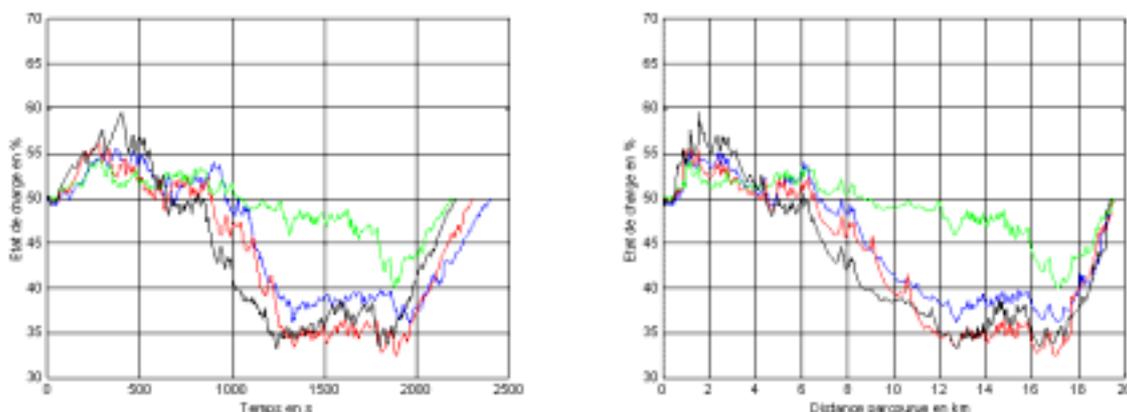


Figure IV.3 – Représentation de plusieurs réalisations d'un même trajet (trajet n°1).

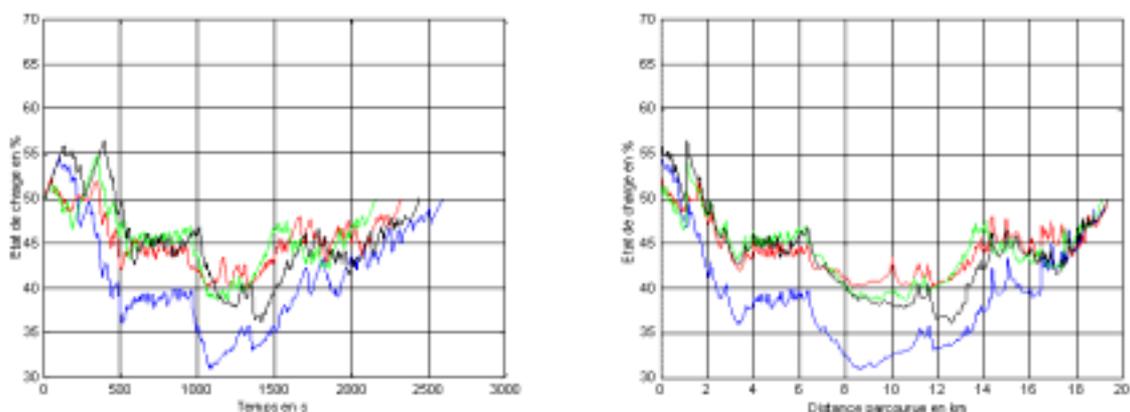


Figure IV.4 – Représentation de plusieurs réalisations d'un même trajet (trajet n°2).

Ces essais ont mis en évidence plusieurs phénomènes :

- ☞ même pour un bus, qui a des contraintes importantes sur les horaires de passage aux arrêts, il existe une variation importante de la durée du parcours ;

- ☞ on observe des variations des quelques pour-cents de l'état de charge théorique en passant d'une réalisation à une autre, par contre il existe une vraie reproductibilité des tendances (charge ou décharge sur des parties similaires des cycles) ;

- ☞ pour un même trajet, certaines réalisations ne pourront pas être jugées comme suffisamment reproductibles pour permettre un apprentissage du profil d'état de charge (par exemple, la courbe verte de la Figure IV.3).

Nous pouvons déduire de ces remarques que le système d'apprentissage devra être réalisé en fonction de variables spatiales telles que la distance parcourue, ou mieux encore de coordonnées géographiques, et non en fonction de variables temporelles. De plus, le système de supervision locale ne devra pas être sensible aux petites variations d'état de charge, mais définir plutôt les tendances générales de fonctionnement sur le cycle. Enfin, un système d'évaluation de la reproductibilité des réalisations devra être intégré au niveau de l'apprentissage, puisque la connaissance a priori d'informations de haut niveau (ligne de bus, heure de départ,...) n'est pas suffisante pour garantir la ressemblance des réalisations d'un même trajet.

Nous avons donc montré par ces premiers essais l'existence d'une certaine reproductibilité des réalisations d'un même trajet, à condition d'éliminer de la comparaison certains cycles. Regardons maintenant comment les remarques faites dans cette étude vont être intégrées dans le module de « suivi de SOC » ou supervision locale.

3 - Le module « suivi de SOC ».

Ce deuxième niveau de la commande adaptative doit permettre de faire le lien entre les lois de gestion d'énergie instantanées paramétrées et le niveau de prise en compte d'un profil d'état de charge de la batterie lié au trajet suivi. Concrètement pour notre application, ce module de « suivi de SOC » remplace la fonction utilisée dans la Figure III.12 pour la détermination du K en-ligne qui cherchait à stabiliser l'état de charge de la batterie autour d'une valeur moyenne. Ce module souhaite maintenant déterminer la valeur du paramètre K permettant de suivre le profil d'état de charge désiré. Pour cela, le correcteur modifie le paramètre K en fonction de l'erreur entre l'état de charge désiré et celui réalisé Δe tel que :

$$K = K_0 + \Delta K(\Delta e) \quad \text{équation IV.1}$$

L'objectif étant d'asservir les tendances de l'état de charge de la batterie sur le cycle, la correction de K suivant l'équation IV.1 en fonction de l'erreur d'état de charge n'a pas besoin d'être effectuée à chaque pas de calcul. Au contraire, elle doit intervenir quand l'erreur moyenne pendant un certain temps est conséquente. Pour que l'action du correcteur ne pénalise pas la consommation, il est nécessaire que

- ∞ ΔK soit très faible si Δe est faible (remarque du paragraphe précédent),
- ∞ ΔK soit moyen si Δe est moyen (fonctionnement normal),
- ∞ ΔK soit très grand si Δe est grand (pour ne pas avoir des dérives trop importantes qui pourrait déclencher les modes dégradés).

Les paragraphes suivants présentent les développements effectués pour obtenir un « suivi de SOC » satisfaisant.

3.1 - Utilisation de correcteurs proportionnels

La première idée pour réaliser ce correcteur consiste à modifier K proportionnellement à l'erreur d'état de charge. Pour prendre en compte les remarques du paragraphe précédent, trois cas ont été distingués :

- ∞ pour une erreur inférieure au pour-cent d'état de charge batterie, aucune correction n'est nécessaire ;
- ∞ pour une erreur de quelques pour-cent, la correction est proportionnelle à l'erreur (d'où son nom de correcteur proportionnel) ;
- ∞ pour une erreur supérieure à 3%, le fonctionnement doit être « maximal », c'est-à-dire sur les contraintes de puissance batterie (décharge ou recharge maximale).

Sur une des réalisations des trajets précédents, les résultats obtenus avec le correcteur proportionnel décrit ci-dessus sont les suivants :

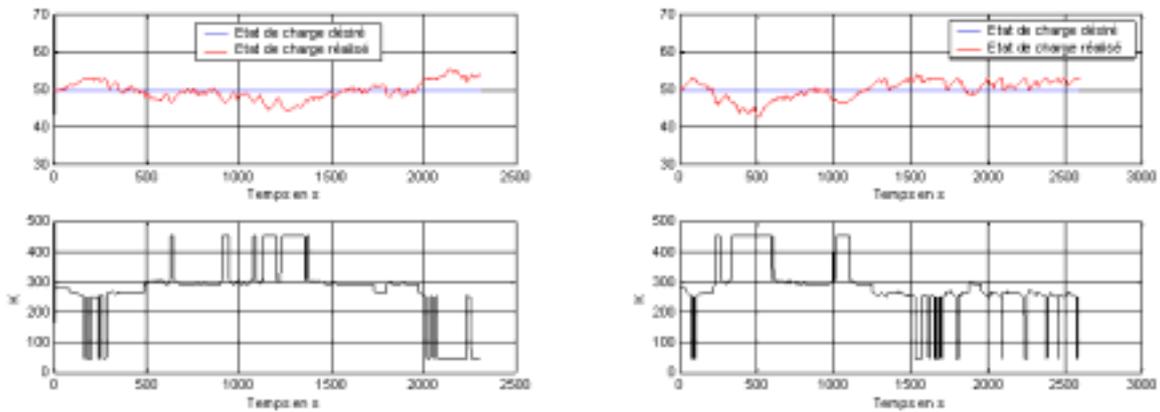


Figure IV.5 – Fonctionnement du module de « suivi de SOC » en utilisant le correcteur proportionnel.

Comme on peut le voir sur la Figure IV.5, le correcteur précédent a tendance à avoir un comportement oscillant au voisinage des seuils de changement de comportement. C’est pourquoi, il apparaît intéressant d’utiliser une fonction continue de l’erreur de l’état de charge pour modifier le paramètre K .

3.2 - Généralisation par continuité

Les fonctions de type cosinus ou sinus hyperbolique semblent être de bons candidats pour la réalisation du module de « suivi de SOC » puisque leur sortie varie peu au voisinage de zéro et augmente exponentiellement avec l’erreur. Pour disposer du fonctionnement décrit dans l’introduction de ce sous-chapitre, les fonctions du type de l’équation IV.2 ont été utilisées :

$$\Delta K = \alpha \cdot [\cosh(\beta \cdot \Delta e) - 1] \cdot \text{sign}(\Delta e) \quad \text{équation IV.2}$$

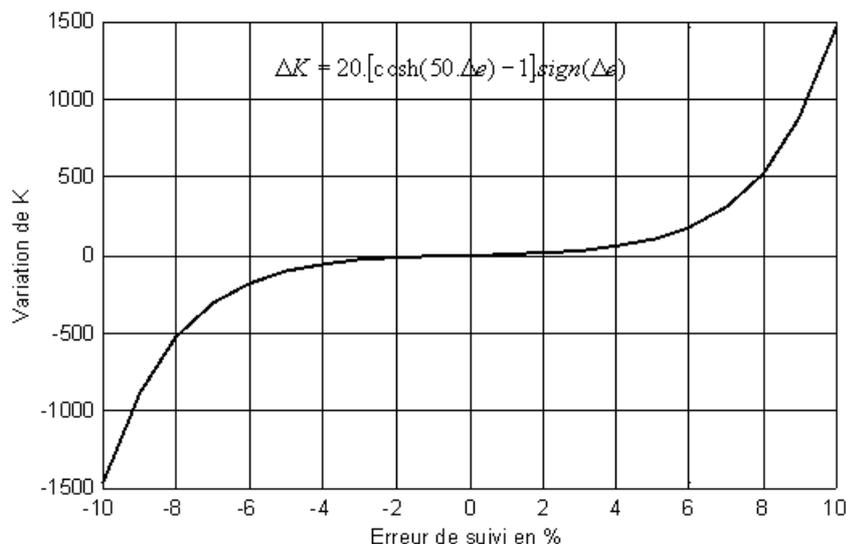


Figure IV.6 - Exemple de fonction utilisée.

Reprenons donc les réalisations utilisées dans la Figure IV.5 pour visualiser l'apport d'une correction continue de l'erreur sur l'état de charge de la batterie :

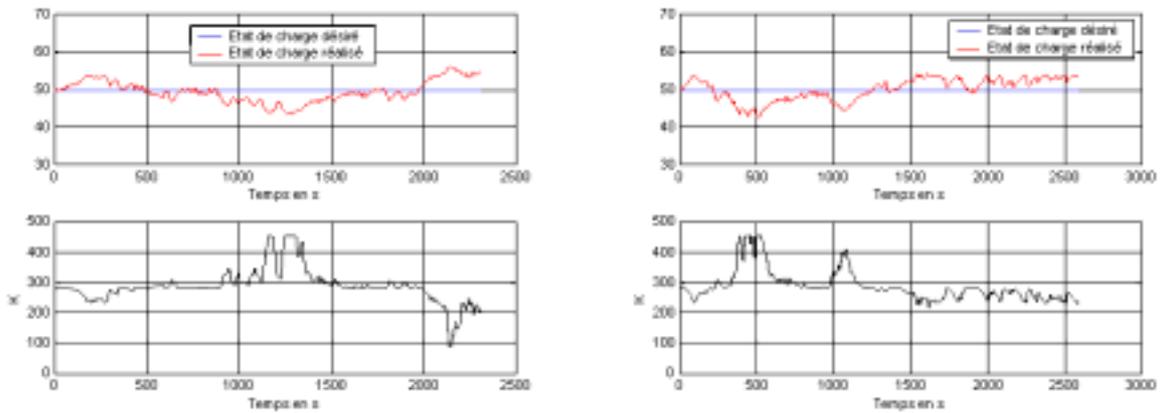


Figure IV.7 - Fonctionnement du module de « suivi de SOC » en utilisant un correcteur continu.

Le module de « suivi de SOC » obtenu corrige correctement le défaut observé sur le correcteur proportionnel, en saturant beaucoup moins le paramètre K . Cependant, ce correcteur étant dédié à suivre un profil variable d'état de charge, il reste à évaluer son comportement sur le profil issu de l'optimisation hors-ligne. Les résultats obtenus sont visualisés sur la Figure IV.8 :

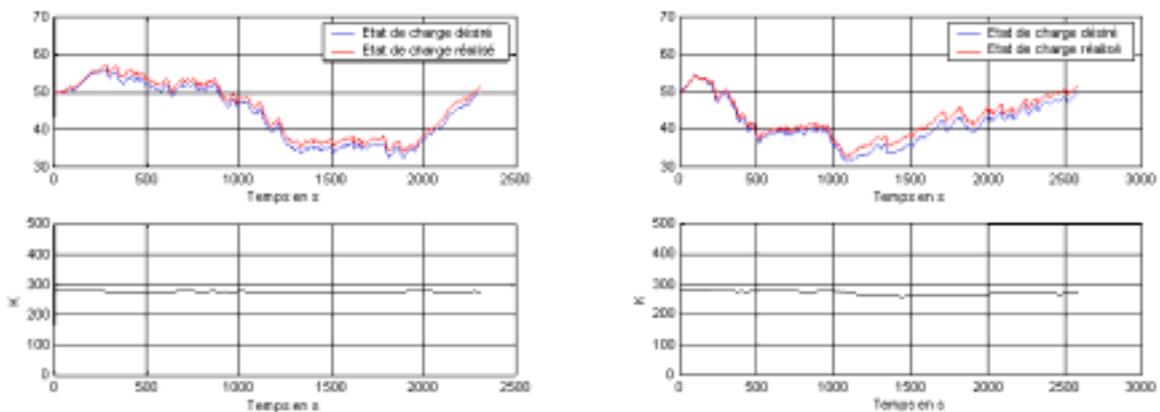


Figure IV.8 - Fonctionnement du module de « suivi de SOC » en utilisant un profil désiré non constant.

Ces résultats confirment l'existence d'un paramètre K , constant sur le cycle suivi en l'absence de contraintes sur l'état de charge de la batterie. Par contre, cette valeur constante étant inconnue (excepté par une recherche hors-ligne), le paramètre K est initialisé à une valeur « moyenne », ce qui peut entraîner une erreur résiduelle dans le suivi. Ce phénomène est encore plus visible sur la Figure IV.9, correspondant à une mauvaise appréciation a priori de la valeur de K :

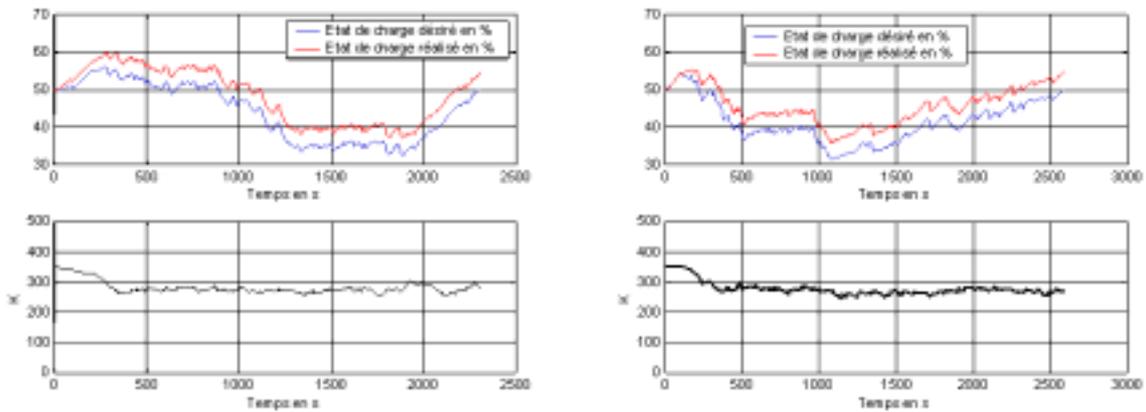


Figure IV.9 - Fonctionnement du module de « suivi de SOC » en utilisant un profil désiré non constant et une mauvaise appréciation a priori de la valeur de K .

3.3 - Ajout d'une action intégrale

Pour compenser la méconnaissance a priori du paramètre K pour le cycle suivi, une action intégrale a été prise en compte dans le correcteur. On obtient alors dans les cas du paragraphe précédent les suivis des courbes IV.10 et IV.11 :

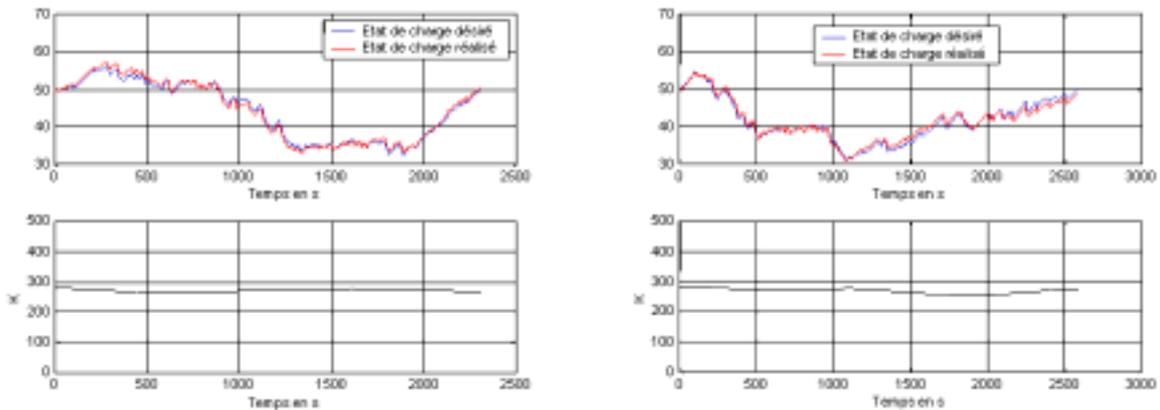


Figure IV.10 - Fonctionnement du module de « suivi de SOC » en ajoutant une action intégrale.

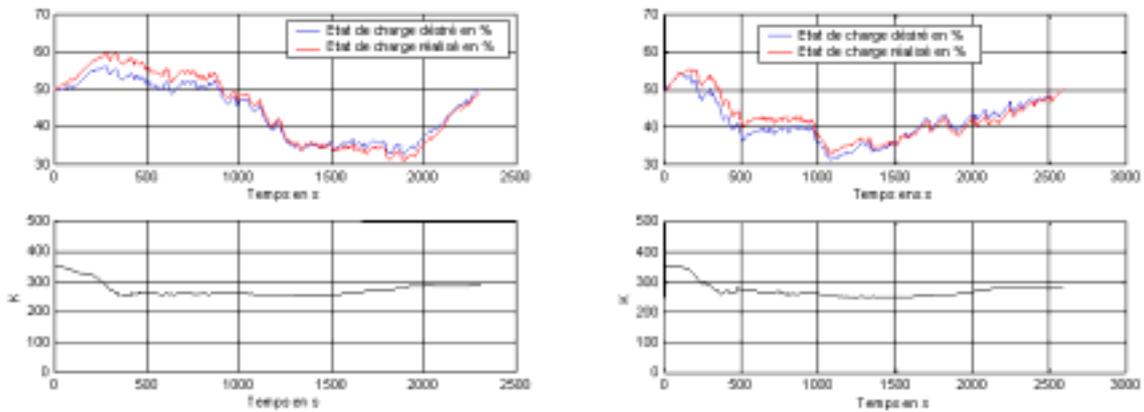


Figure IV.11 - Fonctionnement du module de « suivi de SOC » en ajoutant une action intégrale (mauvais appréciation a priori de la valeur de K).

En définitive, la solution retenue correspond à l'équation :

$$K = K_0 + \alpha [\cosh(\beta \cdot \Delta e) - 1] \cdot \text{sign}(\Delta e) + \gamma \int \Delta e \quad \text{équation IV.3}$$

Le choix des paramètres α , β et γ a été réalisé en fonction de leur impact en terme de surconsommation engendrée et d'efficacité du suivi. En particulier, les règles de caractérisation du module de « suivi de SOC », énoncées en début du sous-chapitre 3.1, ont été respectées.

Nous disposons maintenant de lois de gestion d'énergie en-ligne, susceptibles de suivre un profil d'état de charge désiré, dans la mesure, bien évidemment, où celui-ci est réalisable. Il nous reste donc à déterminer ce profil à partir des connaissances que nous avons sur le trajet suivi.

4 - Principe de l'apprentissage du parcours.

Comme le montre la Figure IV.12, les lois de gestion d'énergie proposées prenant en compte le trajet suivi se décomposent en trois parties :

- ☞ la reconnaissance du trajet a priori,
- ☞ la détermination du profil d'état de charge à suivre,
- ☞ l'évaluation de la réalisation et son intégration dans les connaissances acquises sur ce trajet.

Ce paragraphe va maintenant préciser le but de ces trois phases et les développements associés.

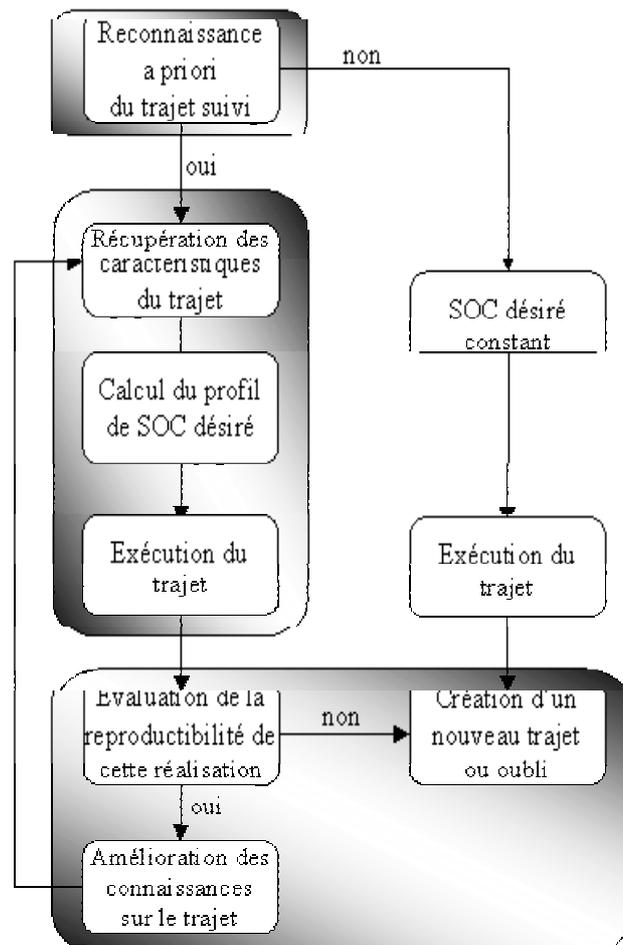


Figure IV.12 – Organisation des lois de gestion d'énergie avec prise en compte du trajet effectué.

4.1 - La phase de reconnaissance du trajet suivi.

Le trajet suivi est reconnu a priori à partir d'informations de haut niveau, telles que le jour de la semaine, l'heure de départ, la température extérieure et, bien évidemment, le numéro de la ligne à parcourir..., ce qui permet de récupérer des données sauvegardées lors de précédentes réalisations, à la fois sur la puissance de traction nécessaire à la réalisation du trajet et sur la consommation des auxiliaires. Cette phase ne sera pas développée par la suite, puisque la reconnaissance de la ligne est fournie par la société exploitante et les modèles d'auxiliaires développés sont trop simples. Cependant, pour prendre en compte la consommation des auxiliaires, nous supposons que nous sommes en hiver et nous utiliserons une information sur l'ouverture et la fermeture des portes du bus pour simuler la partie de la consommation des auxiliaires liés au cycle suivi.

4.2 - La phase d'obtention du profil d'état de charge désiré.

Le trajet suivi étant reconnu a priori, cette deuxième phase va traiter les connaissances sauvegardées sur le trajet pour les rendre exploitables par le module de supervision locale ou « suivi de SOC ». Dans un premier temps, un profil de puissance électrique demandée, à la fois pour la traction et pour les auxiliaires, va être reconstitué, qui servira ensuite à déterminer le profil d'état de charge optimal correspondant.

4.2.1 - Sauvegarde des informations sur le cycle.

Pour des questions de mémoire, il n'est pas concevable d'enregistrer précisément la puissance électrique demandée pour caractériser le trajet suivi (échantillonnage de l'ordre de la seconde). Une première idée pour limiter la place prise par les données est d'augmenter leur période d'échantillonnage. Mais ceci ne permet pas, en réalité, de résoudre le problème, puisque le nombre de points à conserver sans perte d'information reste relativement important, comme le montrent la Figure IV.13 et la Figure IV.14.

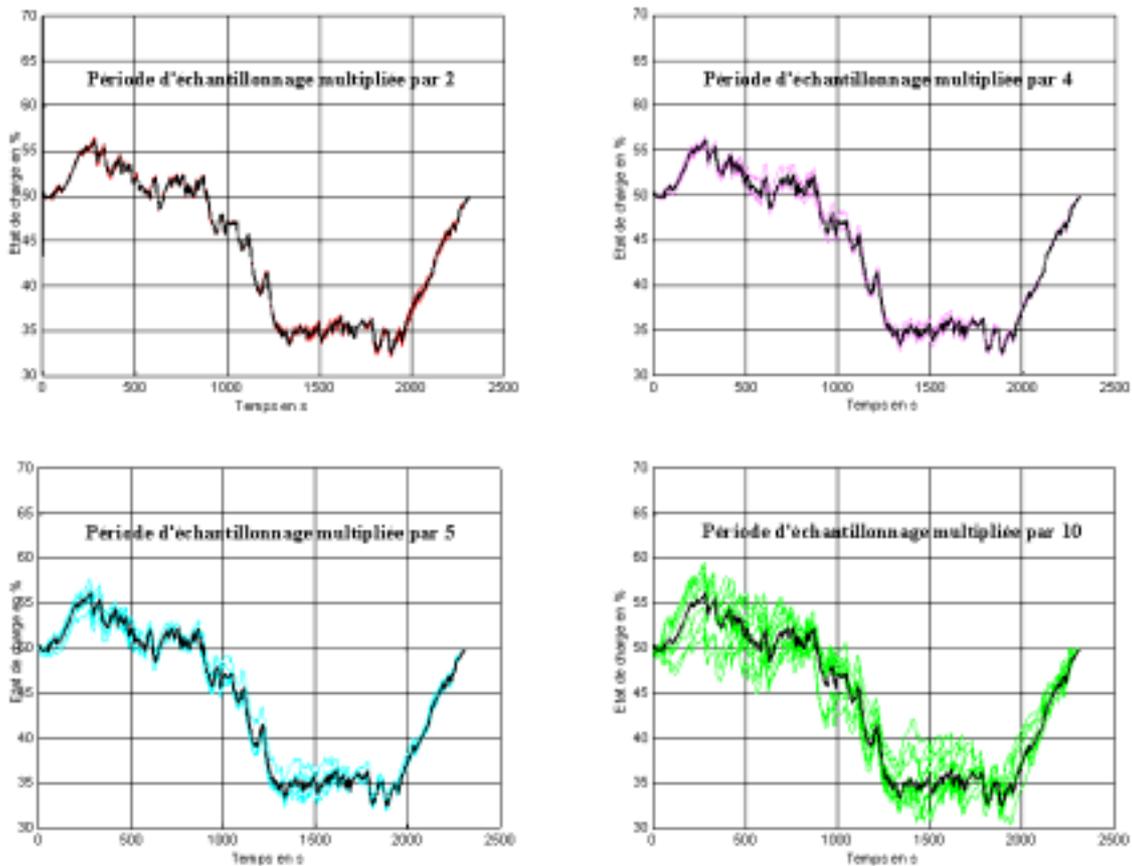


Figure IV.13 – Profils d'état de charge théoriques obtenus par augmentation de la période d'échantillonnage (trajet N°1).

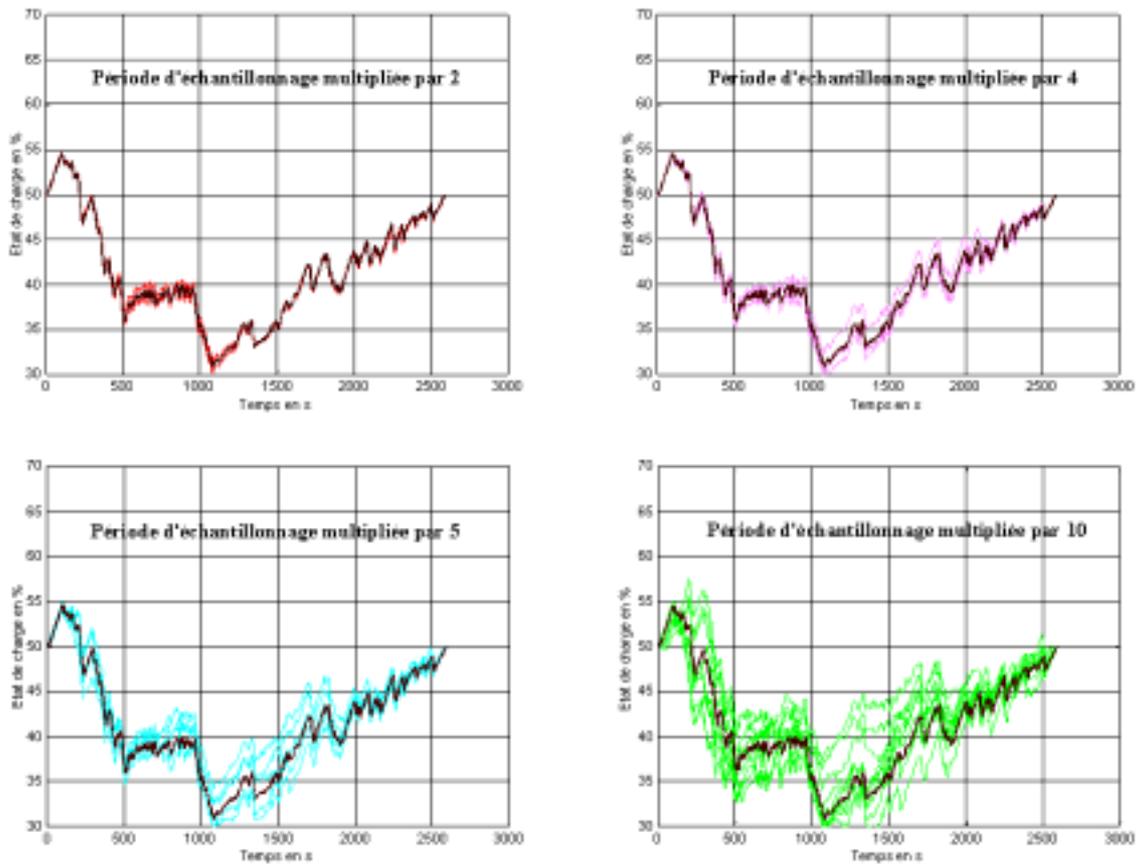


Figure IV.14 – Profil d'état de charge théorique obtenu par augmentation de la période d'échantillonnage (trajet N°2).

De plus, nous avons vu dans le paragraphe 2 de ce chapitre, qu'il est préférable d'utiliser des informations en fonction de la distance parcourue plutôt que du temps, pour garantir une reproductibilité suffisante des cycles et permettre un apprentissage du profil d'état de charge. Nous allons donc travailler à partir de cycles élémentaires obtenus par découpage en fonction de la distance parcourue et chercher une ou plusieurs informations permettant de reconstituer le profil d'état de charge désiré ou au moins ses tendances.

Une première solution pourrait être d'utiliser des informations moyennes sur ces cycles élémentaires, dans notre cas la puissance moyenne. Cependant, l'utilisation d'une puissance moyenne a tendance à déformer voire à faire disparaître l'information à cause du traitement spécifique des puissances négatives dans un hybride (cf. Figure IV.15). En effet, la détection d'une puissance négative implique généralement une coupure du moteur thermique, pour permettre une récupération maximale du freinage récupératif.

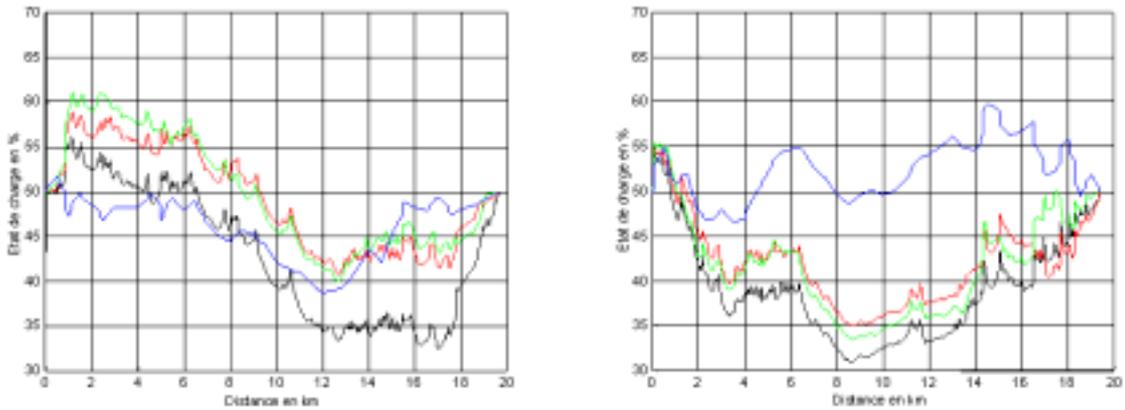


Figure IV.15 – Profil d'état de charge théorique obtenu par utilisation d'une puissance moyenne sur une fenêtre de 50 (rouge), 100 (vert) et 500 (bleu) m pour les trajets N°1 et N°2.

La solution la plus satisfaisante trouvée consiste à discrétiser la puissance demandée, c'est-à-dire à sauvegarder le profil de puissance sous forme d'un ensemble d'histogrammes associés à chaque cycle élémentaire tel que ceux de la Figure IV.16.

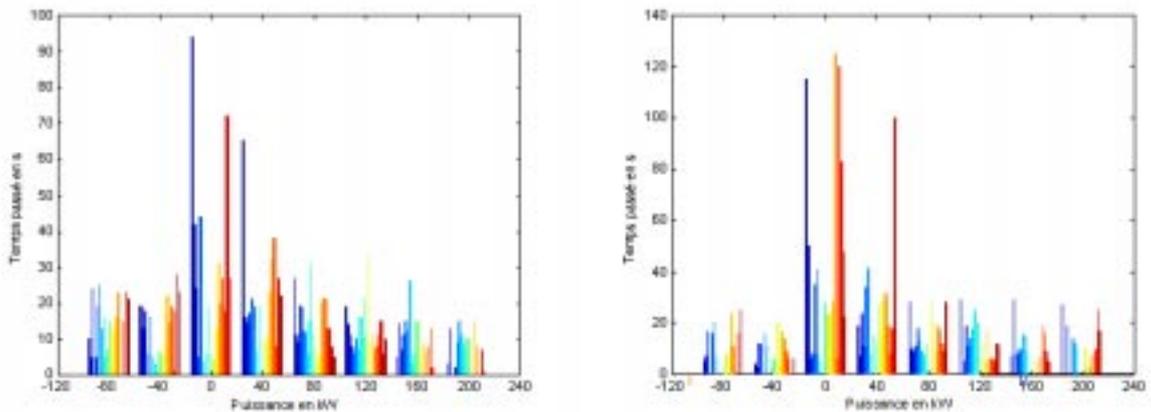


Figure IV.16 – Exemple d'histogrammes obtenus pour une des réalisations des trajets N°1 et N°2 avec des cycles élémentaires de 1 km.

Un « profil reconstitué » de puissance est ensuite obtenu par lissage, en organisant la puissance par ordre croissant puisqu'une partie de l'information temporelle a été perdue. Nous allons voir, plus précisément, dans le paragraphe suivant, cette méthode qui servira à obtenir le profil d'état de charge à suivre.

4.2.2 - Obtention du profil d'état de charge.

La première étape consiste à découper le trajet en cycles élémentaires (découpage de l'ordre du kilomètre) et à sauvegarder le profil de puissance électrique demandée sous forme d'un histogramme. Un exemple de cette étape est donné sur la Figure IV.17, où l'histogramme correspondant au premier kilomètre d'une des réalisations du trajet N°1 est représenté.

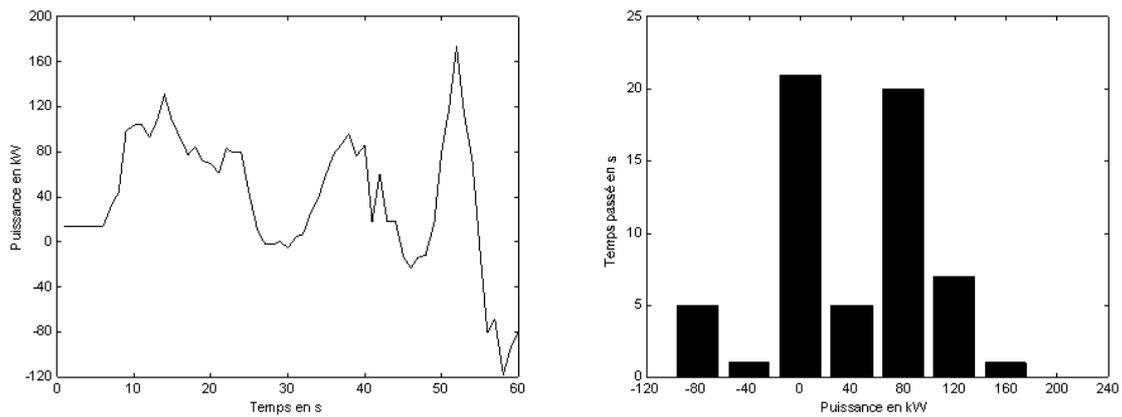


Figure IV.17 – Exemple de création d’histogrammes pour le 1^{er} kilomètre d’une des réalisations du trajet N°1.

Ensuite, l’histogramme peut être retraduit en « profil temporel » de puissance électrique demandée, comme le montre la courbe verte de la Figure IV.18. Il est à noter que cette courbe caractérise la répartition de la puissance sur le premier kilomètre du cycle suivi, mais que l’information temporelle réelle a été perdue. Elle sera donc comparée au profil réel réarrangé, c’est-à-dire en rangeant les puissances par ordre croissant. Le « profil » issu des histogrammes n’est pas utilisable tel quel pour l’obtention du profil d’état de charge : il doit auparavant être lissé. Nous utilisons pour cela une approximation par un polynôme qui permet de fournir de nouveau la diversité des puissances.

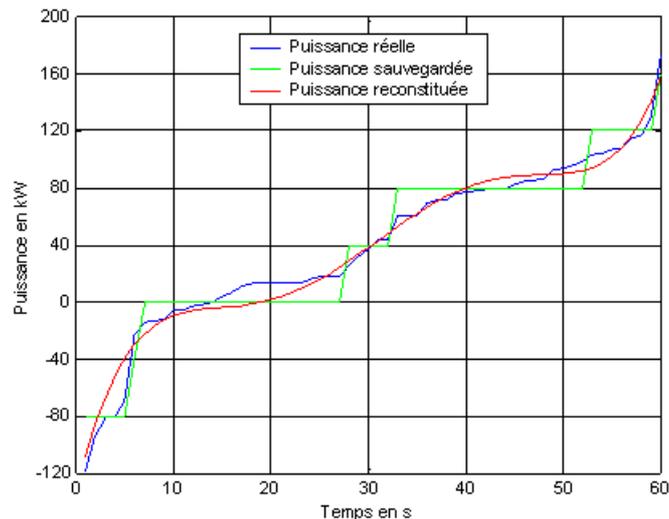


Figure IV.18 – Reconstitution d’un profil de puissance à partir d’un histogramme.

En appliquant cette méthode sur chaque cycle élémentaire, nous pouvons reconstituer à partir des histogrammes un profil de puissance fictif, sur lequel nous pouvons déterminer le profil d’état de charge théorique correspondant par dichotomie. Il suffit, ensuite, d’extraire les points

remarquables, c'est-à-dire les points d'état de charge à la fin de chaque cycle élémentaire. La Figure IV.19 visualise les résultats obtenus par cette méthode en comparant les profils d'état de charge théoriques issus de la connaissance complète du profil de puissance et du profil reconstitué.

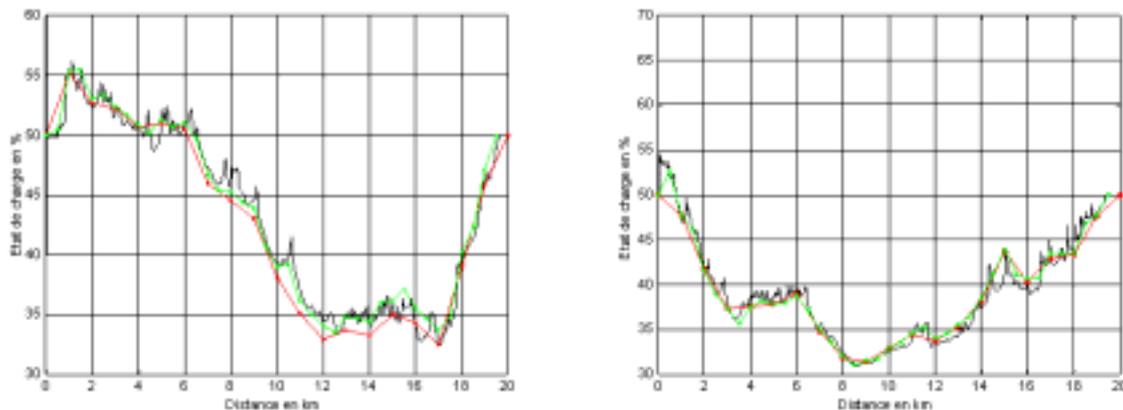


Figure IV.19 – Profil d'état de charge théorique obtenu par utilisation d'histogrammes de puissance sur 500 (rouge) et 1000 (vert) m pour une réalisation des trajets N°1 et N°2.

4.2.3 - Intérêt de la méthode.

La méthode d'obtention de l'état de charge de la batterie proposée permet de conserver l'essentiel de la connaissance qui nous intéresse, c'est-à-dire les tendances de charge et de décharge de la batterie, tout en diminuant notablement le nombre de valeurs à conserver. A titre d'exemple, pour les cycles des trajets N°1 et N°2, il est nécessaire de disposer de 160 valeurs correspondant aux 20 histogrammes à sauvegarder pour obtenir un profil d'état de charge de la batterie. Si on avait directement sauvegardé le profil de puissance, entre 2155 et 2590 valeurs auraient été nécessaires pour une période d'échantillonnage de 1s, soit environ 15 fois plus de données. Cette situation aurait rendu délicate l'embarquabilité de la méthode.

En définitive, le trajet est caractérisé par un ensemble d'histogrammes de puissance électrique demandée qui peut être traduit relativement simplement en profil d'état de charge désiré. Mais, avant de voir comment vont être déterminés ces histogrammes à partir des différentes réalisations, il semble important de détecter les réalisations non reproductibles pour ne pas les intégrer dans les connaissances déjà acquises.

4.3 - La phase d'évaluation de la réalisation.

Pour déterminer le profil d'état de charge à suivre, nous souhaitons disposer uniquement de réalisations reproductibles. Autrement dit, cette phase d'évaluation de la réalisation a pour but de séparer¹¹ au mieux les deux

¹¹ ou discriminer

classes « reproductibles » et « non reproductibles » à l'aide de variables explicatives. Nous allons donc faire appel aux méthodes de l'analyse discriminante.

4.3.1 - Les méthodes envisageables.

Deux objectifs peuvent être distingués dans les méthodes d'analyse discriminante selon que l'on souhaite :

- ☞ élaborer des règles d'affectation des individus à l'une des classes pour les appliquer ensuite à de nouveaux individus (méthode décisionnelle¹²) : méthodes de reconnaissance des formes, réseaux de neurones,...

- ☞ déterminer les variables et/ou leur association les plus pertinentes pour différencier les classes (méthode explicative) : méthodes de régression, méthodes d'Analyse Factorielle Discriminante,...

Les méthodes décisionnelles peuvent, bien évidemment, être précédées d'une phase de pré-traitement des données telles qu'une Analyse en Composantes Principales pour réduire l'espace de représentation en éliminant les critères corrélés. Ces outils permettent de mieux décrire l'espace de représentation, mais ne permettent pas de déterminer les critères les plus discriminants, c'est-à-dire ceux qui séparent le mieux les différentes classes. La technique la plus répandue pour trouver ces critères discriminants est l'Analyse Factorielle Discriminante qui recherche les combinaisons linéaires des variables explicatives qui minimisent la dispersion intra-classe tout en maximisant la dispersion inter-classe. Dans ces conditions, on obtient bien les critères les plus pertinents, c'est-à-dire qui différencient le mieux les classes.

4.3.2 - Les spécificités du problème.

Dans le problème étudié, nous devons rechercher les variables d'entrée pertinentes (variables explicatives), qui permettent d'expliquer la variable de sortie (l'éventuelle reproductibilité de la réalisation) et leurs règles de décision associées. Ensuite, nous allons utiliser ce modèle pour prédire l'appartenance à cette classe de nouvelles réalisations. Nous avons donc à la fois des considérations explicatives et décisionnelles fortes. De plus, le résultat devra être facilement utilisable dans un calculateur de véhicule (autrement dit, représentable sous forme d'une base de règles). Nous nous sommes donc orientés vers les méthodes de discrimination par arbre qui sont les plus simples à mettre en œuvre dans la catégorie définie.

4.3.3 - La méthode retenue.

La méthode CART (Classification And Regression Tree de [Breiman-L, Friedman-J, Olshen-R et al., 1984] et [Ansaldi-N, 2001]) cherche à résoudre des problèmes de discrimination en segmentant de façon itérative l'échantillon pour obtenir un arbre de décision binaire. Le résultat obtenu est constitué de pavés de bases rectangulaires dans l'espace des variables

¹² Le choix de l'espace de représentation est alors figé.

explicatives, comme le montre la Figure IV.20. Dans ce problème, la variable à expliquer est qualitative (réalisation reproductible ou non reproductible).

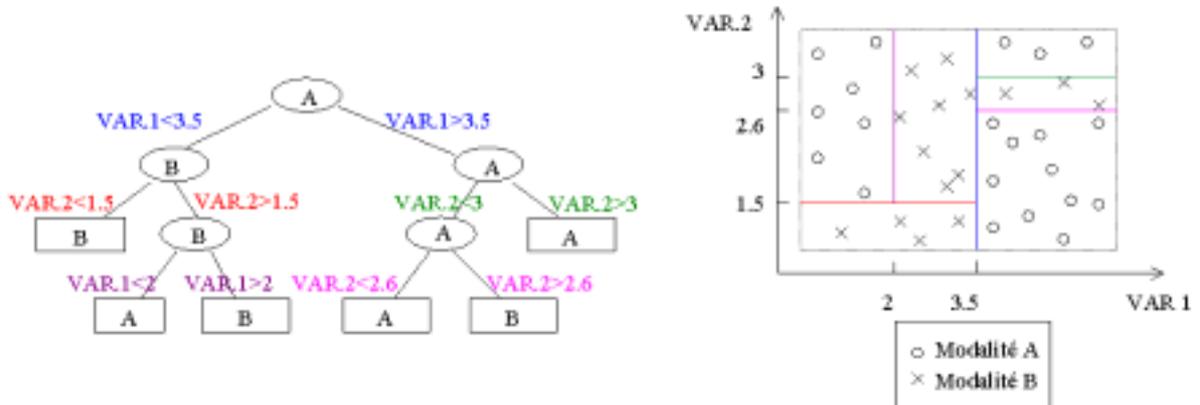


Figure IV.20 – Illustration des résultats (arbre binaire et partition de l'espace) issus de la méthode CART.

A chaque nœud, la méthode CART recherche la variable explicative $Var.i$ et le seuil $Val_Var.i$ associé qui maximise la variation d'hétérogénéité $\Delta hêt$ définie par :

$$\Delta hêt = hêt(\text{noeud}) - p_{\text{gauche}} \cdot hêt(\text{gauche}(Var.i, Val_Var.i)) - p_{\text{droite}} \cdot hêt(\text{droite}(Var.i, Val_Var.i))$$

équation IV.4

où $gauche(Var.i, Val_Var.i)$ est le sous-ensemble du nœud tel que $Var.i < Val_Var.i$

$hêt(\text{ensemble}) = \sum_{u \neq v} p(u|\text{ensemble}) \cdot p(v|\text{ensemble})$ est la fonction d'hétérogénéité avec $p(u|\text{ensemble})$, la fréquence d'apparition de la modalité u dans l'ensemble (le nœud, le sous-ensemble gauche, le sous-ensemble droit,...)

$$p_{\text{gauche}} = \frac{\text{nombre_de_réalisations_dans_l'ensemble_gauche}}{\text{nombre_de_réalisations_dans_le_noeud}}$$

La fonction d'hétérogénéité est nulle quand toutes les observations appartiennent à la même classe. On obtient alors une partition optimale de l'espace pour ce critère d'hétérogénéité. Si l'arbre obtenu est trop grand, une deuxième étape d'élagage peut être nécessaire. Il s'agit de supprimer les branches les moins intéressantes du point de vue de la discrimination des classes.

4.3.4 - Les variables explicatives envisageables.

Pour mettre en application la méthode CART décrite ci-dessus, il nous faut auparavant déterminer une liste de variables explicatives qui pourront servir à construire l'arbre de décision. Une analyse rapide de ce problème permet de mettre en évidence 3 familles de variables permettant :

☞ l'évaluation de la reproductibilité de la traction à partir de la puissance électrique demandée servant uniquement à la traction ou de la vitesse de la réalisation,

☞ l'évaluation de la consommation des auxiliaires à partir de leur puissance électrique consommée,

☞ l'évaluation de la reproductibilité du point de vue du profil d'état de charge de la batterie à partir de l'étude du profil d'état de charge théorique ou encore du suivi de SOC.

Pour chaque famille, nous avons donc cherché des critères susceptibles de caractériser la reproductibilité et d'être commun à tout type de trajet. Pour caractériser la traction, un premier critère, tel que celui de l'équation IV.5, peut consister à comparer la puissance électrique moyenne sur cycle de la réalisation (noté avec un indice real) avec celle caractérisant le trajet ou référence obtenu en moyennant n réalisations reproductibles (notée avec un indice réf).

$$cr = \left| P_{moy}^{réf} - P_{moy}^{réal} \right| \quad \text{équation IV.5}$$

Comme la puissance électrique demandée est sauvegardée sous forme d'histogrammes sur des cycles élémentaires, on peut aussi penser à comparer ces histogrammes comme dans l'équation IV.6 où l'on divise par le nombre de cycles élémentaires pour affranchir le critère de la longueur du trajet.

$$cr = \frac{\sum_{i=1}^{nb_cycle_elem} \left(\sum_{j=1}^{nb_Pdisc} \left| P_{i,j}^{réf} - P_{i,j}^{réal} \right| \right)}{nb_cycle_elem} \quad \text{équation IV.6}$$

Des critères similaires peuvent être réalisés avec la vitesse et la puissance consommée par les auxiliaires. En particulier, la vitesse peut être utilisée sous forme de répartition de vitesse, c'est-à-dire d'histogrammes.

Cependant, certains de ces critères peuvent poser quelques problèmes. Un critère issu de l'étude précise des histogrammes, que ce soit ceux correspondant à la puissance électrique demandée en traction ou totale ou ceux de vitesse, peut mettre en évidence les problèmes de localisation des arrêts, ce qui n'est pas souhaitable. En effet, le découpage d'une réalisation en cycles élémentaires étant réalisé en fonction de la distance parcourue, si un arrêt coïncide avec un point de découpage, on peut obtenir des histogrammes fortement différents suivant que l'arrêt est situé dans le cycle élémentaire précédent ou celui suivant. Le choix de la prise en compte de l'arrêt dans un segment ou dans l'autre dépend uniquement de la valeur de l'erreur commise sur la distance parcourue. Pour cette raison, nous rejetterons de la liste de variables explicatives les critères issus de la comparaison d'histogrammes déterminés par cycle élémentaire. Par contre, les critères issus d'une comparaison d'un histogramme prenant en compte la totalité du cycle sont conservés.

De même, les critères concernant la vitesse moyenne ou la puissance électrique moyenne demandée en traction sur le cycle ne sont pas pertinents. En effet, les contraintes imposées sur les horaires de démarrage du bus ont tendance à annuler l'effet d'une augmentation de la vitesse sur la portion précédente comme le montre la Figure IV.21. Autrement dit, si le chauffeur a été très rapide sur une partie du cycle, cette non-reproductibilité ne sera pas visible sur un critère moyen puisque l'arrêt suivant sera beaucoup plus long. Seule la puissance moyenne des auxiliaires peut être utilisée et sera conservée.

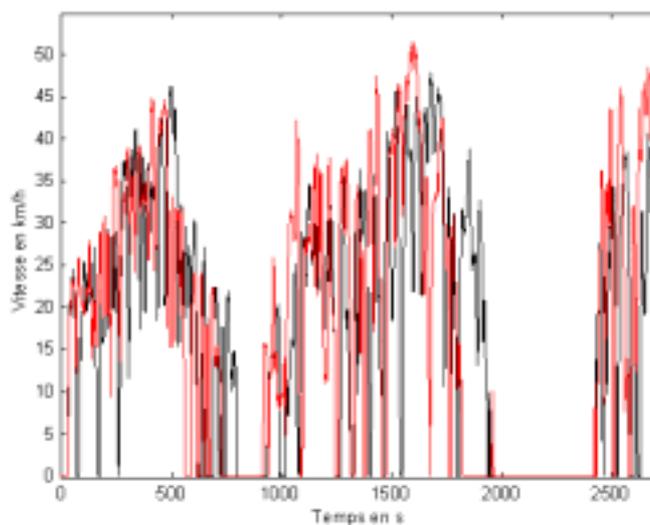


Figure IV.21 – Comparaison des profils de vitesse de deux réalisations d'un même parcours.

En ce qui concerne l'étude du profil d'état de charge théorique, nous pouvons également comparer le SOC issu de la référence et celui issu de la réalisation au point de jonction des cycles élémentaires. Par contre, la détermination de l'état de charge étant obtenue par intégration du courant de la batterie (modèles simplifiés du chapitre III-2), de très légères déviations peuvent se propager sur tout le profil et aboutir à des variations importantes en terme de SOC. Il est donc préférable de comparer les variations d'état de charge entre deux points de jonction i et $i+1$:

$$\Delta SOC_i = SOC_{i+1} - SOC_i \quad \text{équation IV.7}$$

Nous pouvons également évaluer la « difficulté » à suivre un profil d'état de charge donné par l'intermédiaire du paramètre K . Plus précisément, il s'agira de prendre en compte les éventuelles saturations de K qui caractérisent, pour la réalisation considérée, la tentative de suivre un profil non adapté. Une autre possibilité consiste à caractériser le suivi en comparant par exemple le profil désiré et le profil réalisé.

Pour l'utilisation de la méthode CART, nous retiendrons donc les critères suivants¹³ :

∞ la comparaison d'histogrammes de puissance électrique demandée avec et sans les auxiliaires déterminés sur la totalité du cycle,

$$cr_1 = \sum_{j=1}^{nb_Pdisc} |P_j^{réf} - P_j^{réal}| \quad \text{équation IV.8}$$

$$cr_2 = \sum_{j=1}^{nb_Ptracdisc} |Ptrac_j^{réf} - Ptrac_j^{réal}| \quad \text{équation IV.9}$$

où nb_Pdisc et $nb_Ptracdisc$ correspondent au nombre de barres des histogrammes de puissance.

∞ la comparaison d'histogrammes de vitesse déterminés sur la totalité du cycle,

$$cr_3 = \sum_{j=1}^{nb_Vdisc} |V_j^{réf} - V_j^{réal}| \quad \text{équation IV.10}$$

où nb_Vdisc correspond au nombre de barres de l'histogramme de vitesse.

∞ la comparaison de la puissance moyenne consommée par les auxiliaires,

$$cr_4 = |Paux^{réf} - Paux^{réal}| \quad \text{équation IV.11}$$

∞ la comparaison des variations de l'état de charge théorique de la batterie sur chaque cycle élémentaire,

$$cr_5 = \sum_{i=1}^{nb_cycle_elem-1} \left(\Delta SOC_i^{réf} - \Delta SOC_i^{réal} \right) \quad \text{équation IV.12}$$

où nb_cycle_elem correspond au nombre de cycles élémentaires du trajet.

∞ la comparaison de l'état de charge demandé (autrement dit l'état de charge théorique de la référence) et celui réalisé lors du suivi de SOC,

$$cr_6 = \int |SOC^{réf}(t) - SOC^{réal}(t)| dt \quad \text{équation IV.13}$$

∞ la comparaison de la consommation théorique,

¹³ Dans tous les critères, l'indice réf caractérise la moyenne de n réalisations considérées comme reproductibles et l'indice réal correspond à la réalisation considérée.

$$cr_7 = |Conso^{réf} - Conso^{real}| \quad \text{équation IV.14}$$

∞ le pourcentage de la distance du cycle passé à K saturée.

$$cr_8 = Dsat^{real} \quad \text{équation IV.15}$$

Les variables explicatives pertinentes et les seuils correspondants seront déterminés dans le chapitre suivant à partir des résultats de la campagne d'essais effectuée à Chambéry.

4.4 - Intégration de la notion de reproductibilité dans les connaissances acquises.

Les règles permettant de déterminer la reproductibilité ou la non-reproductibilité d'une réalisation étant figées, il est alors possible de déterminer comment intégrer de nouvelles connaissances dans celles déjà acquises, ce qui revient à modifier au cours des réalisations la référence. En définitive, on cherche donc à mieux caractériser les histogrammes de puissance électrique demandée par cycles élémentaires. Dans un premier temps, les histogrammes au pas $n+1$ étaient obtenus par moyennage des histogrammes des n dernières réalisations comme le montre l'équation IV.16.

$$\forall i \in [1, nb_cycle_elem], \quad \forall j \in [1, nb_Pdisc]$$

$$P_{i,j}^{réf}(n+1) = \frac{(nb_real - 1) * P_{i,j}^{réf}(n) + P_{i,j}^{réal}}{nb_real} \quad \text{équation IV.16}$$

La solution retenue va donc pondérer par p les réalisations dans la moyenne :

∞ les réalisations non reproductibles ne vont pas être prises en compte ($p=0$),

∞ les réalisations reproductibles vont être intégrées dans la moyenne avec $p=1$,

∞ les réalisations classées comme incertaines vont être intégrées avec un poids compris entre 0 et 1.

L'équation IV.16 est alors remplacée par l'équation suivante :

$$\forall i \in [1, nb_cycle_elem], \quad \forall j \in [1, nb_Pdisc]$$

$$P_{i,j}^{réf}(n+1) = \frac{p_tot(n) * P_{i,j}^{réf}(n) + p(n+1) * P_{i,j}^{réal}}{p_tot(n) + p(n+1)} \quad \text{équation IV.17}$$

où $p_tot(n) = \sum_{k=1}^n p(k)$, $p(k)$ est le poids donné à la réalisation k

Cette partie sera également validée dans le chapitre suivant à partir de résultats expérimentaux.

5 - Conclusion.

Nous avons développé, dans ce chapitre, de nouvelles lois de gestion d'énergie pour les véhicules hybrides prenant en compte le trajet suivi. Cette méthode, applicable à tout type d'architectures de véhicules hybrides, est basée sur la gestion spécifique de l'état de charge de la batterie. Plus précisément, l'objectif recherché est de définir un profil d'état de charge dépendant de variables spatiales telles que la distance parcourue et lié au trajet suivi. Pour cela, le trajet effectué est reconnu a priori à partir d'informations de haut niveau (issu d'un système de navigation, par exemple) et un profil d'état de charge associé aux connaissances déjà acquises sur le trajet spécifique est déterminé. Dans l'application considérée, ces connaissances sont regroupées sous forme d'un ensemble d'histogrammes de puissance électrique demandée à la fois en termes de traction et de consommation des auxiliaires. Un niveau intermédiaire de supervision locale est utilisé pour asservir l'état de charge de la batterie et garantir le fonctionnement souhaité. Ce module dit « module de suivi de SOC », ne devant pas pénaliser la consommation du véhicule, n'agit pas sur les perturbations locales liées aux réalisations et non au trajet. Finalement, à la fin de l'exécution du trajet, la réalisation est évaluée pour déterminer son degré de reproductibilité vis-à-vis des autres réalisations et est intégrée (ou pas) dans les connaissances déjà acquises. Il nous reste donc, maintenant, à valider le gain apporté par cette méthode, ce qui sera le sujet du prochain chapitre de ce mémoire.

Chapitre V - VALIDATION DES RESULTATS.

Ce chapitre valide l'intérêt de disposer de lois de gestion d'énergie s'adaptant au parcours effectué. Pour cela, les résultats s'appuient sur une campagne d'essais effectués entre novembre 2001 et janvier 2002 sur un véhicule en situation normale de fonctionnement.

Cette application permet de démontrer l'existence d'une reproductibilité des réalisations d'un même parcours du point de vue du profil d'état de charge de la batterie. De plus, l'utilisation de cette reproductibilité se traduit pour notre application par un gain de 1 à 2% vis à vis de lois de gestion d'énergie déjà optimisées mais figées.

Nous avons également précisé la notion de reproductibilité des réalisations d'un même parcours en appliquant la méthode CART (Classification And Regression Trees) à notre problème. Nous avons ainsi obtenu une unique variable explicative de cette reproductibilité que nous avons intégrée dans le module d'acquisition des connaissances sur le parcours suivi.

Par ailleurs, cette validation permet d'ouvrir de nouvelles perspectives pour les lois de gestion d'énergie de tous les autres véhicules hybrides, en particulier pour les véhicules particuliers.

Dans le chapitre précédent, nous avons développé des lois de gestion d'énergie pour un bus hybride utilisant la connaissance a priori du trajet suivi. La Figure V.1 rappelle les principales étapes du processus de commande dont l'état de charge de la batterie est la variable principale. Nous allons chercher itérativement à définir au mieux le profil d'état de charge associé au parcours considéré pour minimiser la consommation énergétique du véhicule.

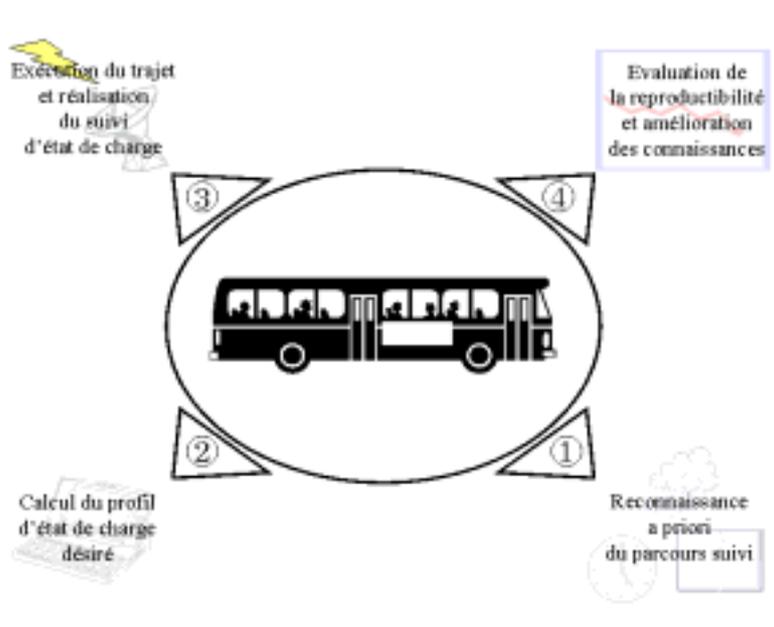


Figure V.1 – Les différentes phases des lois de gestion d'énergie développées.

Dans les chapitres précédents, les développements ont été réalisés à partir d'un nombre très restreint de données (4 réalisations de chaque parcours) issues d'enregistrements obtenus par un véhicule particulier suivant un bus. Le détail des cycles utilisés est regroupé en annexe de ce mémoire. Le point critique de ce travail réside dans l'existence d'une reproductibilité des réalisations d'un même parcours pour ce qui est des variations d'état de charge de la batterie en fonction de la distance parcourue. Nous allons donc maintenant valider ces résultats à partir de parcours réalistes enregistrés directement sur un bus.

1 - Description de la campagne d'essais.

Pour valider les développements effectués, il est nécessaire de disposer d'une base de données constituée de profils de mission répétitifs. Ces enregistrements doivent caractériser le trajet suivi, c'est-à-dire l'utilisation qui est faite du véhicule et non le type de motorisation ou de chaîne de traction. Il n'est donc pas nécessaire qu'ils soient obtenus à partir d'un véhicule hybride, puisque les résultats seront ensuite déterminés par simulation numérique du véhicule hybride sur le profil de mission considéré. Par contre, il serait préférable que le même véhicule et le même conducteur

soient utilisés pour toute la base de données (ou tout du moins pour chaque trajet considéré) afin d'éviter d'éventuelles perturbations « extérieures » des résultats. Les données doivent être obtenues à un pas d'échantillonnage de l'ordre de la seconde pour être utilisables en simulation. Les informations obtenues sous forme statistique (répartition fréquentielle de la variable, par exemple) ne conviennent pas.

Les bases de donnée existantes ne correspondant pas à notre besoin. En effet, en ce qui concerne les véhicules prêtés à des clients par l'intermédiaire d'un concessionnaire, il n'existe aucune maîtrise des trajets effectués. De plus, les enregistrements ne concernent que des données statistiques (sous forme de comptage d'événement ou de répartition fréquentielle) pour limiter la mémoire à embarquer vis à vis du temps entre chaque relevé. Nous avons donc réalisé une campagne de mesure spécifique sur un véhicule conventionnel, appartenant à la société STAC de la ville de Chambéry. Aucune consigne spécifique quant à l'utilisation de ce véhicule n'a été fournie à la société exploitante, en dehors d'une durée de roulage du véhicule maximale. Nous ne disposerons donc pas d'information sur d'éventuelles alternances de chauffeurs.

1.1 - Moyens utilisés.

La réalisation de la base de données a nécessité l'instrumentation d'un véhicule. Ce paragraphe va donc décrire brièvement la centrale d'acquisition installée à Chambéry.

1.1.1 - La vitesse du véhicule.

L'information vitesse étant présente sur le contrôleur du bus, aucun capteur spécifique n'a été installé. Le signal de sortie de type fréquentiel a été transformé en signal standard à l'aide d'un convertisseur de fréquence de transfert linéaire pour une large bande de vitesse. Seules les très faibles vitesses de l'ordre de quelques kilomètres par heure sont déformées par le convertisseur : non représentatives, elles seront considérées comme nulles par post-traitement.

1.1.2 - L'ouverture/fermeture de portes.

Le tableau de bord du véhicule étant équipé de voyants fournissant l'état des portes, les informations ouverture/fermeture des portes avant et arrière du bus sont donc également présentes sur le véhicule. Elles ont tout simplement été enregistrées à partir de deux entrées tout ou rien.

1.1.3 - La pente de la route.

La pente de la route n'étant pas une information présente sur le bus, un capteur indépendant a été installé. L'inclinomètre est constitué de deux électrodes solidaires entre lesquelles se trouve un liquide diélectrique. Le signal électrique fourni, lié à la capacité créée, varie linéairement avec l'angle d'inclinaison du liquide. Son utilisation nécessite un lissage important pour atténuer les vibrations enregistrées.

1.1.4 - L'enregistreur.

L'enregistreur est constitué d'une carte d'acquisition d'entrées analogiques (pour la vitesse et la pente), d'une carte d'acquisition d'entrées tout ou rien (pour le signal d'ouverture/fermeture de portes), d'un processeur et d'une carte mémoire de 4 Mo. Une mesure de chaque canal sélectionné est enregistrée à une fréquence de 1Hz, lorsque l'information « moteur tournant »¹⁴ est présente. Pour des raisons de sécurité, l'enregistreur est complètement autonome et fonctionne à partir d'une batterie 12 volts indépendante. L'extraction des données est facilement réalisée à partir d'un PC portable via une liaison série. On obtient alors un ensemble de fichiers de la forme :

Date and time	Chan 1	Chan 2	Chan 3	Chan 4
	DEGRE	PAV ¹⁵	PAR ¹⁶	KM/H
14/12/01 13:15:47	-1,33	0	0	0,00
14/12/01 13:15:48	-1,40	0	0	0,00
14/12/01 13:15:49	-1,48	0	0	0,00
14/12/01 13:15:50	-1,48	0	0	0,00
14/12/01 13:15:51	-2,90	0	0	0,00
14/12/01 13:15:52	-3,05	0	0	0,00
14/12/01 13:15:53	-4,11	0	0	1,40
14/12/01 13:15:54	-4,48	0	0	2,95
14/12/01 13:15:55	-3,81	0	0	4,75
14/12/01 13:15:56	-2,98	0	0	5,95
14/12/01 13:15:57	-2,23	0	0	6,95
14/12/01 13:15:58	-1,63	0	0	8,25
14/12/01 13:15:59	-0,88	0	0	9,25
14/12/01 13:16:00	-1,18	0	0	10,50
14/12/01 13:16:01	-0,80	0	0	11,35
14/12/01 13:16:02	-0,05	0	0	11,95
14/12/01 13:16:03	0,33	0	0	12,75
14/12/01 13:16:04	0,40	0	0	13,65
14/12/01 13:16:05	1,23	0	0	14,15
14/12/01 13:16:06	2,05	0	0	14,70
14/12/01 13:16:07	2,28	0	0	15,20

Tableau V.1 – Exemple de données obtenues.

¹⁴ L'enregistrement est effectué uniquement quand le véhicule est en fonctionnement (c'est-à-dire quand le moteur thermique est démarré).

¹⁵ PAV, porte avant.

¹⁶ PAR, porte arrière.

1.2 - Résultats obtenus.

La base d'essais est constituée de 72 jours d'enregistrements, réalisés entre novembre 2001 et janvier 2002. Deux parcours régulièrement suivis ont été identifiés : un parcours de 27 km avec 31 réalisations, correspondant à une succession de lignes de bus généralement effectuée le matin et un parcours de 110 km avec 28 réalisations pour l'après-midi. Ces deux parcours, dont une réalisation est visualisée sur la Figure V.2, vont servir à la validation des lois de gestion d'énergie. La différence entre le nombre de réalisations obtenues et le nombre de jours d'enregistrements est principalement due à la présence de deux zones de vacances scolaires (vacances de Toussaint et de Noël) dans la période d'étude, qui se traduisent par une très forte modification des plannings de rotation des bus.

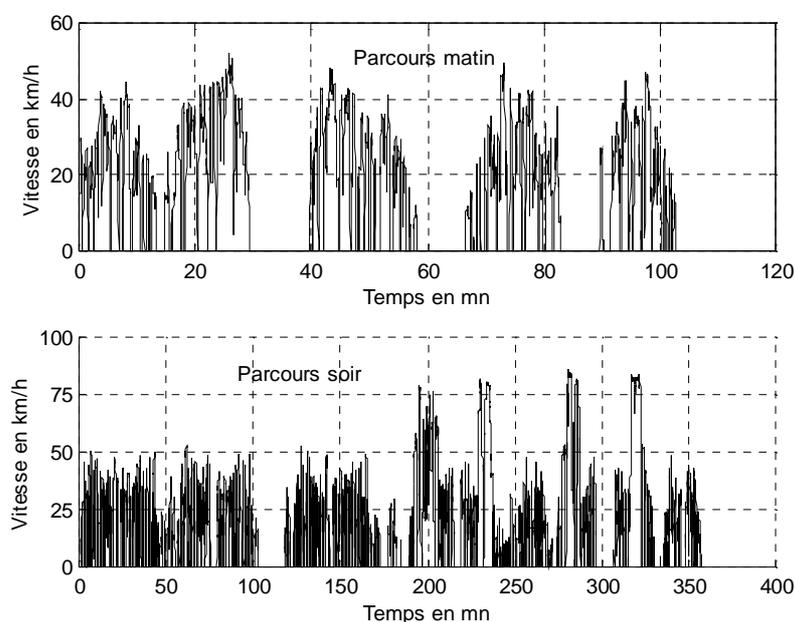


Figure V.2 – Exemple de profils de vitesse correspondant au parcours du matin et au parcours du soir.

Pour valider le fonctionnement des lois de gestion d'énergie s'adaptant au trajet suivi, nous avons développé une interface permettant de comparer différentes gestions d'énergie pour un ensemble de réalisations d'un même parcours. Plus précisément, nous avons distingué cinq catégories :

☞ les lois dites « classiques » correspondent à la définition donnée dans le chapitre III, paragraphe 4.3.4 (démarrage/arrêt du moteur thermique sur des seuils d'état de charge de la batterie et optimisation du seul moteur thermique) ;

- ☞ les lois dites « optimisées » correspondent à l'utilisation des cartographies issues de l'application du principe du maximum avec le suivi d'un profil d'état de charge batterie constant (autrement dit, on cherche à stabiliser l'état de charge de la batterie autour d'une valeur moyenne) ;
- ☞ les lois dites « adaptatives » prennent en compte le parcours suivi en apprenant un profil d'état de charge de la batterie ;
- ☞ les lois dites « théoriques » correspondent au suivi du profil lié à la réalisation et non au parcours (elles constituent donc l'asymptote de la méthode d'adaptation) ;
- ☞ les lois dites « hors-ligne » déterminent la consommation à partir des modèles simplifiés qui ont servi à l'optimisation du système.

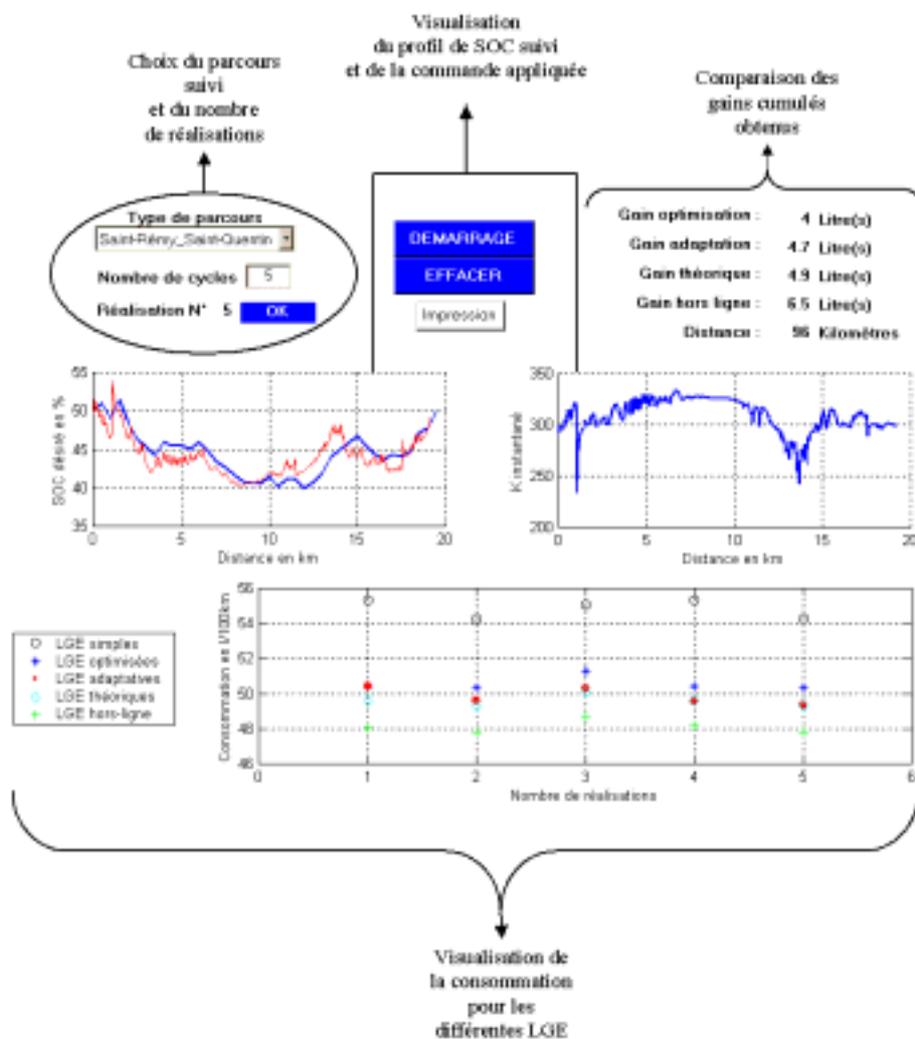


Figure V.3 – Présentation de l'interface développée.

Sur la Figure V.3, qui présente l'interface développée, nous retrouvons les différents éléments nécessaires à la validation : le choix du parcours et le nombre des réalisations à prendre en compte, la visualisation des différentes lois de gestion d'énergie et leur impact en terme de consommation.

Nous allons maintenant appliquer la commande développée aux deux parcours effectués régulièrement par le bus de la ville de Chambéry. Dans un premier temps, nous allons supposer que toutes les réalisations seront reproductibles : elles seront donc intégrées dans le système avec exactement le même poids. Nous verrons, ensuite, l'intérêt de disposer d'un système d'apprentissage plus évolué qui rejette certaines réalisations.

2 - Application au bus hybride sans évaluation de la reproductibilité.

Avant d'évaluer l'apport en terme de consommation des lois de gestion d'énergie qui prennent en compte le parcours, nous allons rapidement confirmer sur l'un des parcours l'existence d'une reproductibilité du profil d'état de charge théorique. Ce test va être effectué sur le parcours du matin.

2.1 - Reproductibilité des réalisations d'un même parcours.

En visualisant sur la Figure V.4 le profil d'état de charge théorique de la batterie, nous pouvons confirmer les résultats obtenus dans le chapitre IV. L'utilisation de l'état de charge fonction d'une variable géographique telle que la distance parcourue permet d'assurer la reproductibilité des réalisations d'un même parcours. Sur cette figure, le pas d'échantillonnage est le kilomètre.

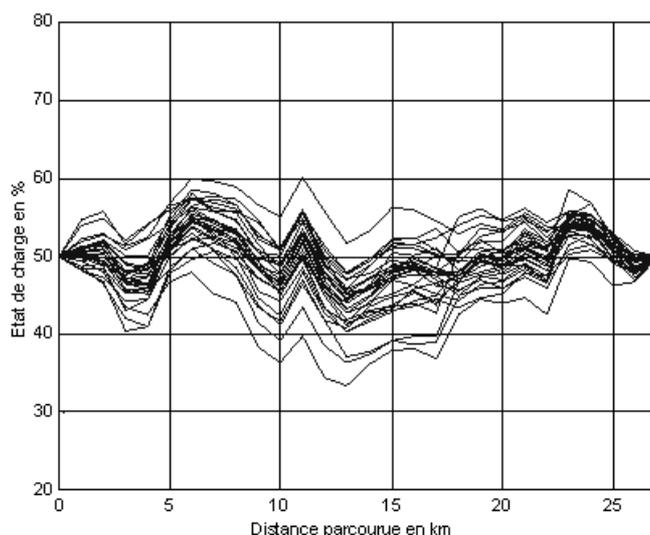


Figure V.4 – Profil d'état de charge théorique en fonction de la distance parcourue pour les réalisations du parcours du matin.

De plus, sur la Figure V.5, qui décrit la variation de l'état de charge de la batterie sur 1 kilomètre pour l'ensemble des réalisations, nous pouvons voir que les tendances sont respectées, même si le cumul des petites perturbations peut engendrer de larges variations d'état de charge au centre de la réalisation (jusqu'à 20% sur la Figure V.4).

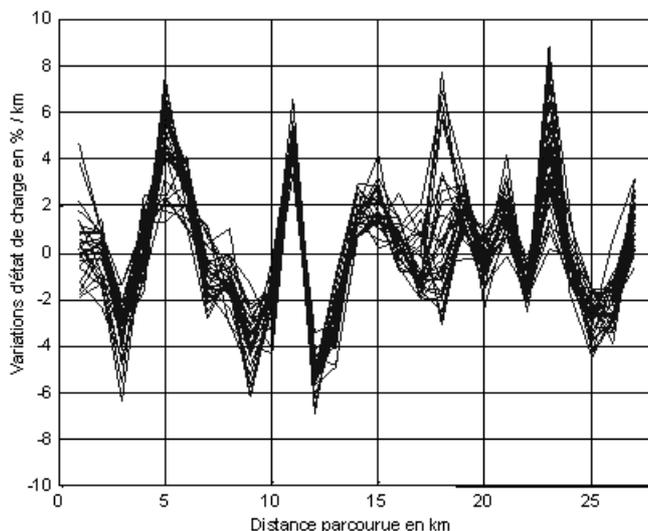


Figure V.5 – Variations de l'état de charge par kilomètre pour les réalisations du parcours matin.

Les cinq lois de gestion d'énergie décrites dans le paragraphe précédent, vont maintenant être évaluées pour l'ensemble des réalisations des deux parcours.

2.2 - Résultats obtenus pour les parcours du « matin » et du « soir ».

Le résultat des lois de gestion d'énergie hors-ligne, ne correspondant pas à une consommation réaliste (utilisation de modèles très simplifiés), est donné en grisé. Les lois adaptatives sont appliquées dès la deuxième réalisation du parcours et le profil appliqué à la réalisation n est obtenu en moyennant les connaissances (c'est-à-dire les histogrammes de puissance par kilomètre) des $(n-1)$ précédentes. Les résultats sont donnés en fonction de la consommation correspondant aux lois de gestion d'énergie classique (base 100). En effet, comme on observe de grandes variations de consommation d'une réalisation à une autre, cette représentation permet de mieux visualiser le gain obtenu par la prise en compte du parcours suivi dans les lois de gestion d'énergie.

	LGE classiques	LGE optimisées	LGE adaptatives	LGE théoriques	LGE hors-ligne
Réalisation N°1	100,00	97,42	97,42	96,18	93,18
Réalisation N°2	100,00	92,35	92,25	91,08	86,75
Réalisation N°3	100,00	91,72	90,81	90,68	86,46
Réalisation N°4	100,00	91,72	90,87	90,90	86,99
Réalisation N°5	100,00	90,43	89,59	89,62	85,76
Réalisation N°6	100,00	93,07	92,29	92,43	74,02
Réalisation N°7	100,00	92,70	92,09	91,95	88,37
Réalisation N°8	100,00	95,90	95,20	95,10	91,60
Réalisation N°9	100,00	93,66	93,19	92,76	89,44
Réalisation N°10	100,00	95,06	94,27	94,28	90,69
Réalisation N°11	100,00	93,74	93,57	92,77	89,84
Réalisation N°12	100,00	94,13	93,67	93,27	89,68
Réalisation N°13	100,00	95,15	94,38	94,04	91,63
Réalisation N°14	100,00	97,00	96,67	95,86	92,75
Réalisation N°15	100,00	95,52	94,51	94,26	90,90
Réalisation N°16	100,00	91,44	90,89	90,61	87,08
Réalisation N°17	100,00	92,49	91,59	91,54	87,81
Réalisation N°18	100,00	92,45	91,46	91,40	87,39
Réalisation N°19	100,00	90,05	89,56	89,18	85,57
Réalisation N°20	100,00	91,71	91,35	91,35	87,60
Réalisation N°21	100,00	95,15	94,54	93,95	90,34
Réalisation N°22	100,00	91,99	91,16	90,92	87,12
Réalisation N°23	100,00	92,82	91,58	91,62	88,00
Réalisation N°24	100,00	96,04	95,11	95,11	91,76
Réalisation N°25	100,00	96,32	95,68	95,27	92,37
Réalisation N°26	100,00	95,98	95,43	95,16	91,68
Réalisation N°27	100,00	95,22	94,57	94,23	90,92
Réalisation N°28	100,00	94,49	93,83	93,42	90,44
Réalisation N°29	100,00	97,45	96,71	96,69	93,51
Réalisation N°30	100,00	95,62	94,87	94,60	91,35
Réalisation N°31	100,00	94,13	93,30	93,33	89,74

Tableau V.2 – Application des différentes lois de gestion d’énergie sur le parcours du matin en l’absence d’évaluation de la réalisation (base 100 pour la consommation correspondant aux lois classiques).

	LGE classiques	LGE optimisées	LGE adaptatives	LGE théoriques	LGE hors-ligne
Réalisation N°1	100,00	94,41	94,41	92,38	88,96
Réalisation N°2	100,00	95,88	95,15	94,54	91,38
Réalisation N°3	100,00	96,37	94,83	94,47	91,29
Réalisation N°4	100,00	95,40	93,83	93,51	90,61
Réalisation N°5	100,00	93,88	92,89	92,26	89,13
Réalisation N°6	100,00	94,02	92,51	92,51	89,54
Réalisation N°7	100,00	94,88	93,06	93,01	89,66
Réalisation N°8	100,00	93,81	92,47	92,25	88,84
Réalisation N°9	100,00	94,76	93,42	93,28	89,54
Réalisation N°10	100,00	93,95	92,55	92,35	89,09
Réalisation N°11	100,00	93,97	92,46	92,51	89,22
Réalisation N°12	100,00	93,46	92,31	92,04	88,37
Réalisation N°13	100,00	94,20	92,73	92,63	89,28
Réalisation N°14	100,00	94,59	93,16	92,98	89,52
Réalisation N°15	100,00	95,31	94,01	93,77	90,51
Réalisation N°16	100,00	96,91	95,57	95,39	92,66
Réalisation N°17	100,00	96,29	94,89	94,77	91,68
Réalisation N°18	100,00	95,25	93,69	93,52	90,09
Réalisation N°19	100,00	94,15	92,60	92,30	89,00
Réalisation N°20	100,00	94,25	92,79	92,63	89,15
Réalisation N°21	100,00	94,59	92,90	92,69	89,43
Réalisation N°22	100,00	94,68	93,07	93,05	89,64
Réalisation N°23	100,00	93,60	92,19	91,79	88,05
Réalisation N°24	100,00	95,49	93,92	93,84	90,66
Réalisation N°25	100,00	96,45	94,66	94,32	91,13
Réalisation N°26	100,00	95,93	94,23	93,99	90,71
Réalisation N°27	100,00	93,58	92,12	91,92	88,61
Réalisation N°28	100,00	95,00	93,45	93,40	90,10

Tableau V.3 – Application des différentes lois de gestion d'énergie sur le parcours du soir en l'absence d'évaluation de la réalisation (base 100 pour la consommation correspondant aux lois classiques).

L'étude des parcours du matin et du soir confirme les résultats déjà obtenus dans le chapitre III : avec les caractéristiques du véhicule définis au début de ce mémoire, l'adaptation des lois de gestion d'énergie permet un gain de consommation supplémentaire de 1 à 2% par rapport à des lois figées

déjà optimisées. L'intérêt de prendre en compte le parcours dans les lois de gestion d'énergie dépend principalement de la diversité des cycles élémentaires présents dans le parcours considéré. Ainsi, dans cette application le parcours du soir permet un gain légèrement plus grand que le parcours du matin en raison de sa longueur plus importante et de l'alternance de zones urbaines et de zones extra-urbaines en fin de parcours. Comme on peut le voir sur la Figure V.6 et la Figure V.7, dès la troisième réalisation du parcours, le profil d'état de charge désiré est très proche de la forme recherchée, ceci se traduit par des saturations du paramètre K moins nombreuses.

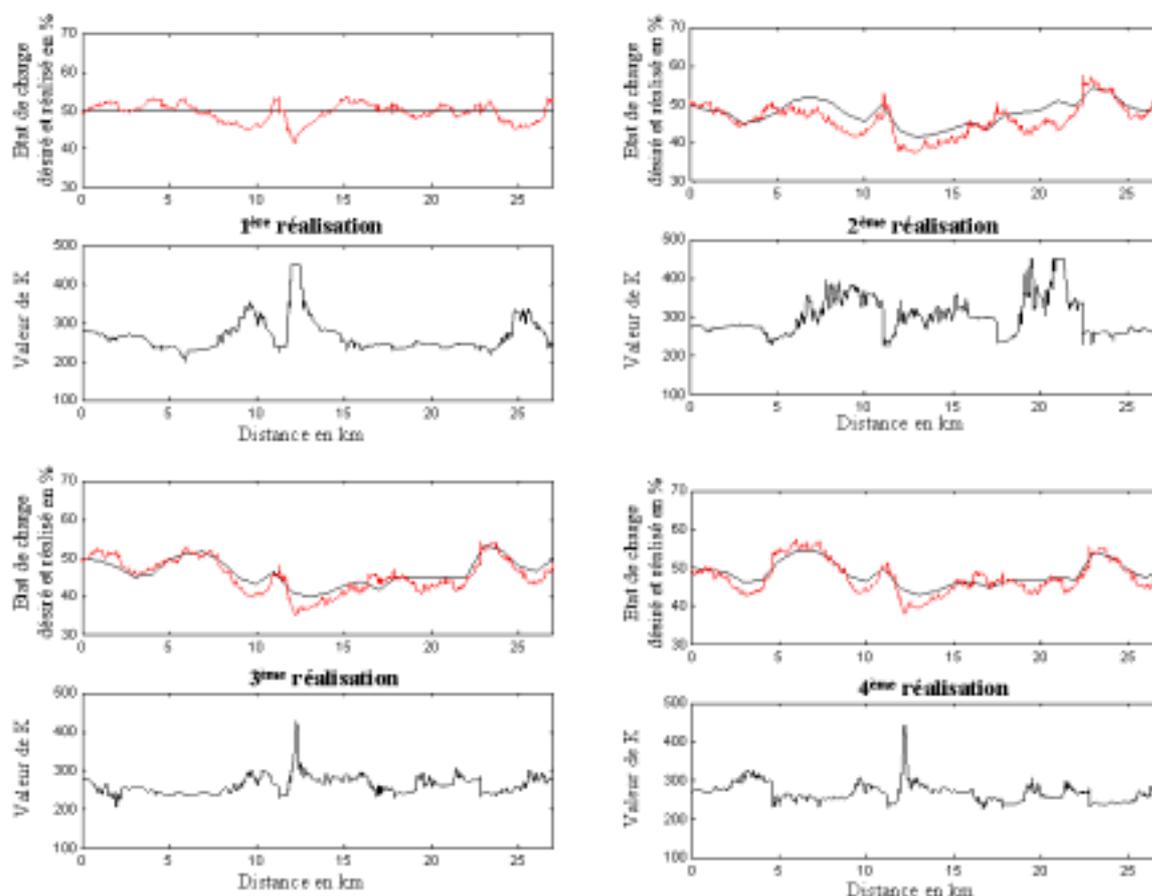


Figure V.6 – Profil de SOC et valeur de K obtenus pour les 4 premières réalisations du parcours du matin.

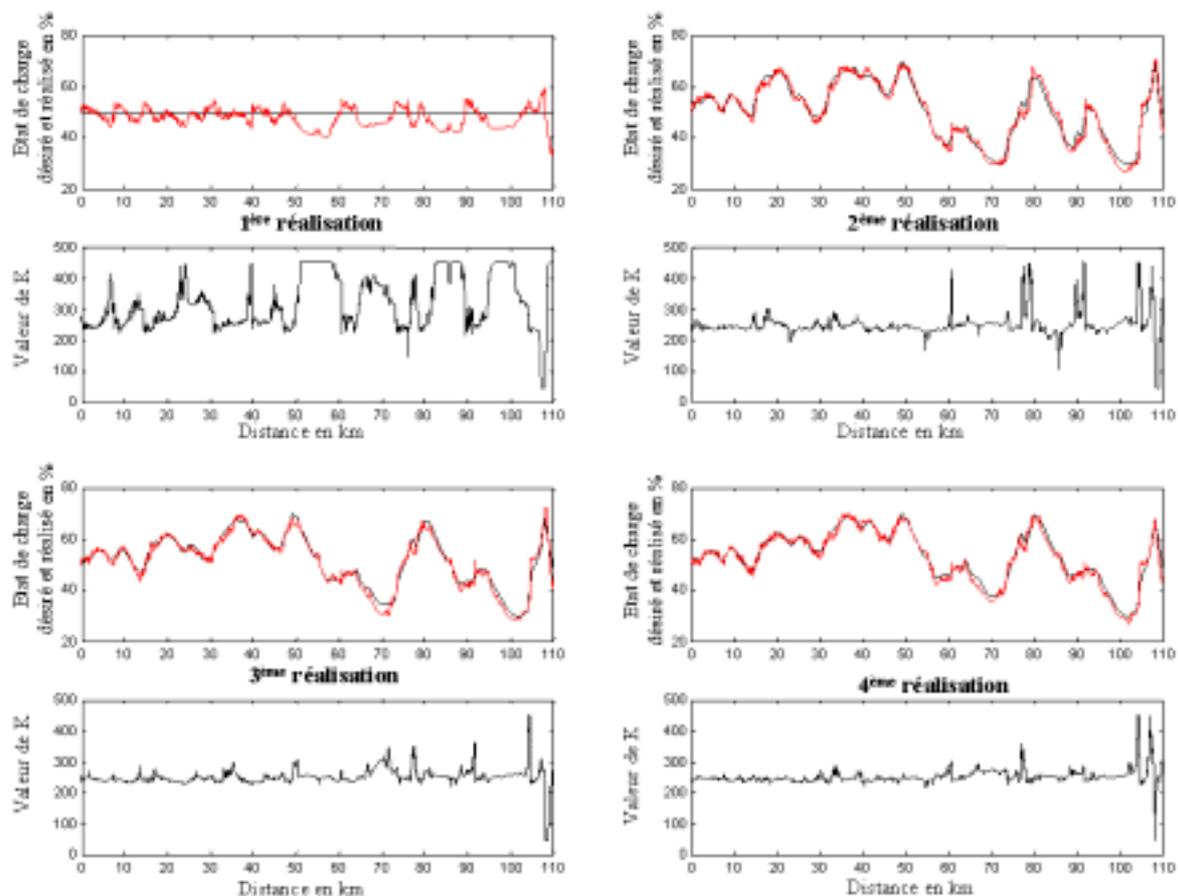


Figure V.7 – Profil de SOC et valeur de K obtenus pour les 4 premières réalisations du parcours du soir.

Comme nous pouvons le voir sur la Figure V.8 et la Figure V.9, les résultats des lois de gestion d'énergie adaptatives sont très proches de la valeur théorique correspondant au suivi du profil d'état de charge de la réalisation (LGE théoriques) et non du parcours (LGE adaptatives). Nous pouvons en déduire que le découpage du parcours en cycles élémentaires de 1 kilomètre est suffisant pour cette application.

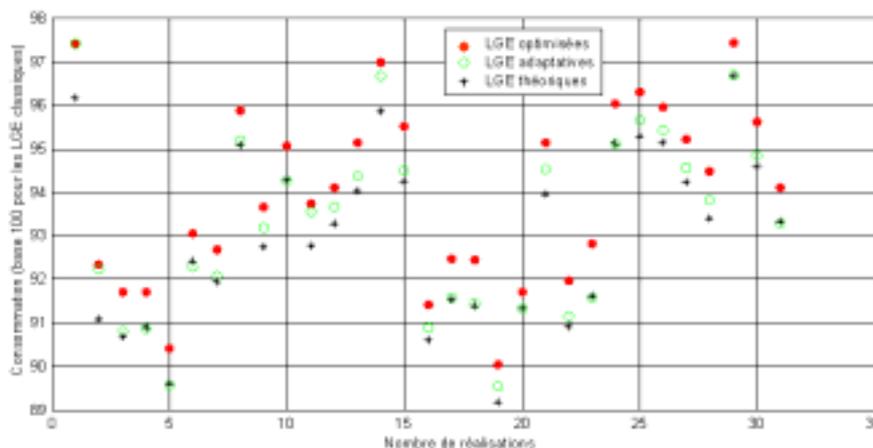


Figure V.8 – Résultats de consommation obtenus précédemment pour le parcours du matin.

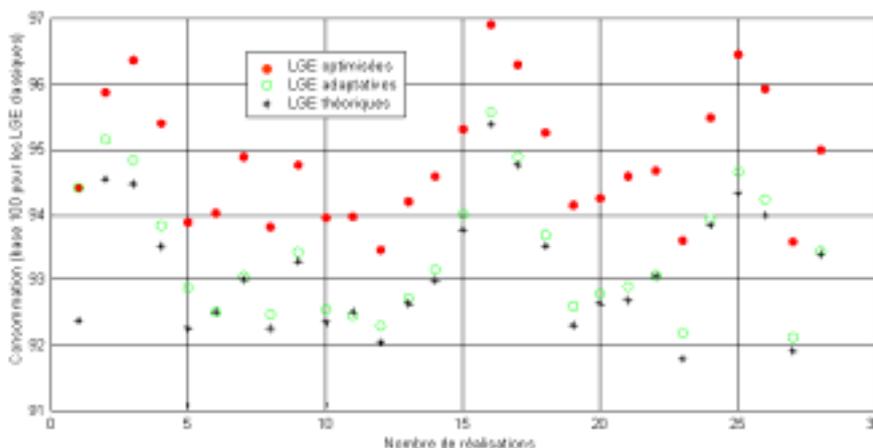


Figure V.9 – Résultats de consommation obtenus précédemment pour le parcours du soir.

Nous allons maintenant valider l’intérêt de prendre en compte la reproductibilité de chaque réalisation dans l’apprentissage du profil d’état de charge correspondant au parcours suivi. Pour cela, nous allons appliquer la méthode CART (Classification And Regression Trees) pour extraire les variables explicatives pertinentes de celles définies dans le paragraphe 4-3 du chapitre IV.

3 - Prise en compte de la non-reproductibilité des réalisations.

L’étude de la prise en compte de la non-reproductibilité de certaines réalisations de la base de données a été décomposée en trois parties. Dans un premier temps, nous allons travailler sur le parcours du matin et déterminer

l'arbre de décision et la base de règles induite correspondant à la segmentation de l'espace en classes « réalisation reproductible » ou « non reproductible ». Ensuite, nous allons voir comment il est possible de prendre en compte cette nouvelle information dans l'apprentissage. Finalement, nous allons déterminer l'impact en consommation de cet ajout sur les deux parcours. Ce travail a été réalisé en collaboration avec un stagiaire de fin d'études [Coz-E, 2002].

3.1 - Evaluation de la reproductibilité.

Pour appliquer la méthode CART au problème du parcours du matin et déterminer ainsi les variables explicatives pertinentes, il est nécessaire de classer a priori les réalisations. Ce point est l'objet de la première partie de ce paragraphe.

3.1.1 - Classification a priori des réalisations.

La classification a priori des réalisations du parcours du matin est réalisée à partir du profil théorique d'état de charge de la batterie, c'est-à-dire de la variable que l'on souhaite apprendre. Pour la majorité des réalisations, ce choix a priori ne pose pas de problèmes puisque les profils théoriques se ressemblent fortement. Cependant, il reste quelques réalisations pour lesquelles il a été impossible de définir l'appartenance ou non à la classe reproductible. Nous avons donc défini une troisième classe correspondant à des réalisations ambiguës. Nous allons ensuite, suivant l'arbre obtenu, soit essayer d'intégrer ces réalisations dans l'une des deux autres classes, soit créer réellement une zone d'incertitude. Les résultats de la classification a priori sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

	Classe		Classe		Classe
Réalisation N°1	R	Réalisation N°12	R	Réalisation N°23	R
Réalisation N°2	NR	Réalisation N°13	R	Réalisation N°24	R
Réalisation N°3	Amb	Réalisation N°14	R	Réalisation N°25	R
Réalisation N°4	Amb	Réalisation N°15	R	Réalisation N°26	R
Réalisation N°5	Amb	Réalisation N°16	R	Réalisation N°27	R
Réalisation N°6	R	Réalisation N°17	Amb	Réalisation N°28	R
Réalisation N°7	R	Réalisation N°18	Amb	Réalisation N°29	R
Réalisation N°8	R	Réalisation N°19	NR	Réalisation N°30	R
Réalisation N°9	R	Réalisation N°20	R	Réalisation N°31	R
Réalisation N°10	R	Réalisation N°21	R		
Réalisation N°11	R	Réalisation N°22	R		

Tableau V.4 – Classification a priori des réalisations du parcours matin en trois classes : reproductible (R), non reproductible (NR) et ambigu (Amb).

3.1.2 - Détermination de l'arbre de décision et de la base de règles induite.

L'application de la méthode CART sur les 31 réalisations fournit un arbre de décision très simple, où toutes les réalisations sont correctement classées, et de la forme présentée Figure V.10 :

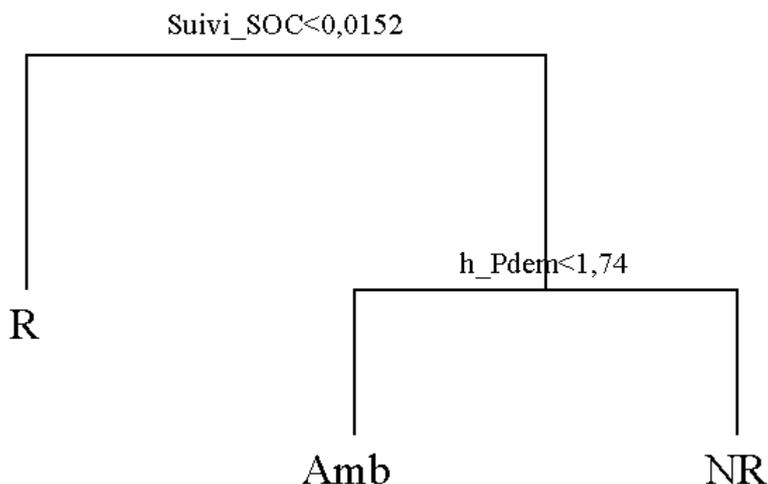


Figure V.10 – Arbre de décision obtenu pour le parcours du matin.

Deux variables explicatives se dégagent : la variable *Suivi_SOC*, correspondant à la comparaison entre l'état de charge demandé et celui réalisé lors du suivi de SOC (équation IV.13) et la variable *h_Pdem*, correspondant à la comparaison des histogrammes de puissance électrique demandée intégrant les auxiliaires et calculés sur l'ensemble du cycle (équation IV.8). Comme les réalisations classées a priori comme ambiguës sont bien distinguées des deux autres classes par la méthode CART¹⁷, il semble bien exister une zone d'incertitude entre les autres classes et non une frontière franche. En visualisant les réalisations dans le plan (*Suivi_SOC*, *h_Pdem*), on obtient la Figure V.11.

¹⁷ Les réalisations définies a priori comme incertaines auraient pu être mélangées avec les éléments des deux autres classes, ce qui aurait permis en réduisant l'arbre de les classer dans les classes reproductibles ou non reproductible.

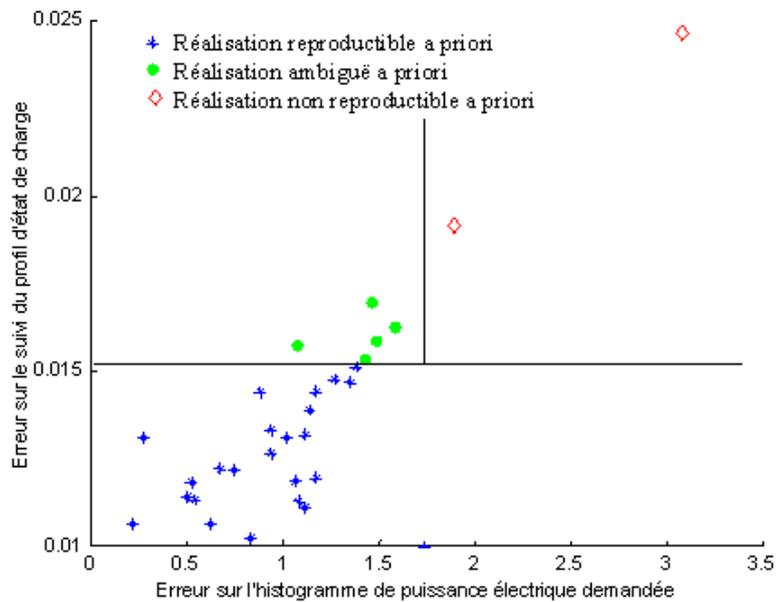


Figure V.11 – Visualisation des trois classes pour le parcours du matin dans le plan des deux variables explicatives choisies.

Regardons maintenant ce que donne ce découpage pour le trajet du soir sur la Figure V.12.

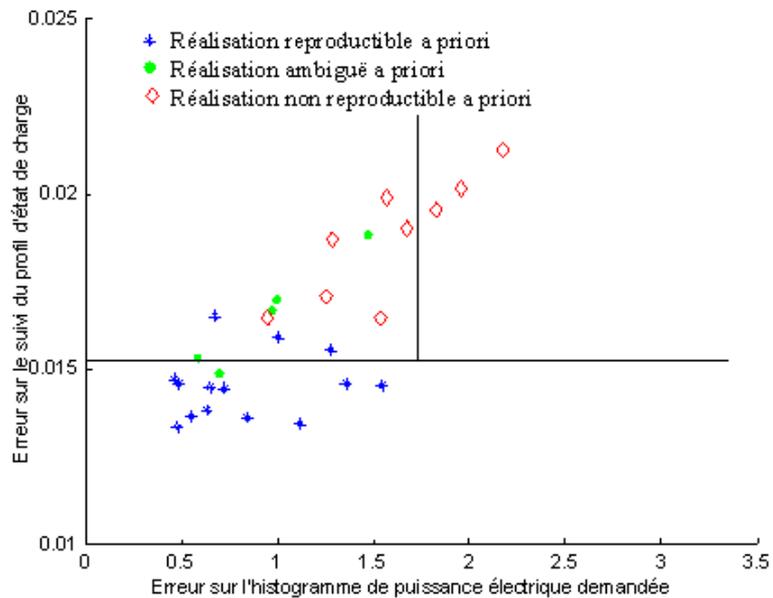


Figure V.12 – Visualisation des trois classes pour le parcours du soir dans le plan des deux variables explicatives choisies.

Comme il est très difficile de classer a priori les réalisations pour le parcours du soir, il existe donc certainement des erreurs dans cette classification. Cependant, il apparaît assez clairement que la variable *Suivi_SOC* est également pertinente pour ce parcours. L'intérêt concernant le résultat de la

variable h_Pdem est plus incertain. On ne considérera donc que la seule variable $Suivi_SOC$ sur laquelle on positionnera le seuil de décision.

Nous allons maintenant voir comment la définition de ces trois classes va être intégrée dans l'acquisition des connaissances.

3.2 - Prise en compte des informations de reproductibilité dans l'acquisition des connaissances.

L'acquisition des connaissances est effectuée en moyennant les histogrammes élémentaires des réalisations. La solution retenue, pour prendre en compte les informations de reproductibilité, consiste alors à pondérer les termes de la moyenne en fonction de leur classe d'appartenance (cf. équation IV.17). Le problème étant relativement simple, nous avons choisi de définir une fonction déterminant le poids donné à une réalisation suivant la valeur de la variable $Suivi_SOC$. Un exemple de fonction utilisée est donné en Figure V.13. Cette fonction rejette à la fois les réalisations non reproductibles et celles ambiguës pour garantir au système de rester dans le domaine reproductible.

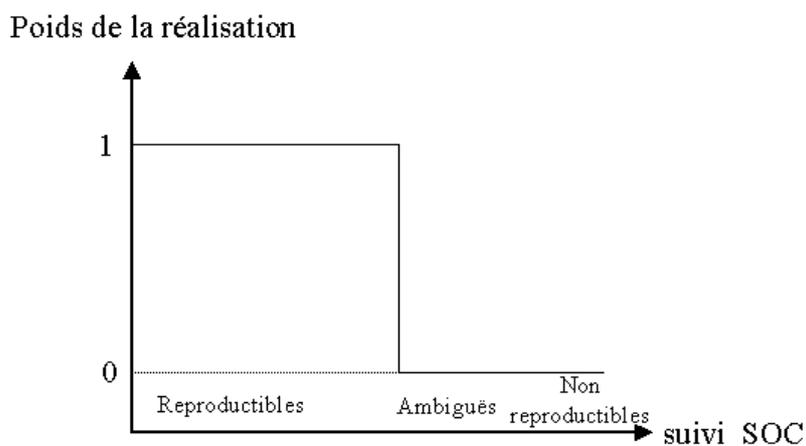


Figure V.13 – Courbe d'obtention du poids de la réalisation suivant sa reproductibilité.

Nous allons, maintenant, déterminer l'impact de ce nouveau bloc en terme de consommation.

3.3 - Résultats obtenus en terme de consommation.

La base d'essais contient peu de réalisations non reproductibles, 2 pour le parcours du matin sur un ensemble de 31 réalisations. Dans ces conditions, la prise en compte des informations de reproductibilité dans l'acquisition des

connaissances aura peu d'influence sur les résultats du paragraphe 2. Ce résultat a déjà été visualisé sur la Figure V.8 et la Figure V.9 où les résultats des lois de gestion d'énergie adaptatives sont très proches de ceux de l'asymptote (LGE théoriques). Par contre, si temporairement toutes les réalisations du parcours deviennent non reproductibles¹⁸, il est intéressant de détecter cette non-reproductibilité pour générer automatiquement de nouveaux parcours.

Pour étudier cette situation, nous avons effectué deux tests. Dans un premier temps, nous avons dupliqué 10 fois¹⁹ la réalisation la moins reproductible du parcours matin et du parcours soir pour étudier son influence en terme de consommation sur les autres réalisations. Ensuite, nous avons fortement modifié la moitié des réalisations du parcours du soir et comparé les résultats d'un apprentissage en 1 classe et en 2 classes.

3.3.1 - Perturbation longue de la reproductibilité.

Comme le montre la Figure V.14, nous avons dupliqué une réalisation non reproductible et visualisé son impact en terme de consommation. En l'absence de prise en compte de la reproductibilité des réalisations, le profil d'état de charge à suivre va être modifié et va tendre vers un profil moyen ne correspondant ni au trajet (c'est-à-dire à la moyenne des réalisations reproductibles précédentes), ni à la réalisation non reproductible. Par contre, si la détection est effectuée, le « bon profil » va être obtenu, ce qui se traduit par une amélioration de la consommation sur les réalisations reproductibles. Nous pouvons plus facilement constater cet impact en visualisant uniquement la consommation des réalisations identifiées comme reproductibles (Figure V.15).

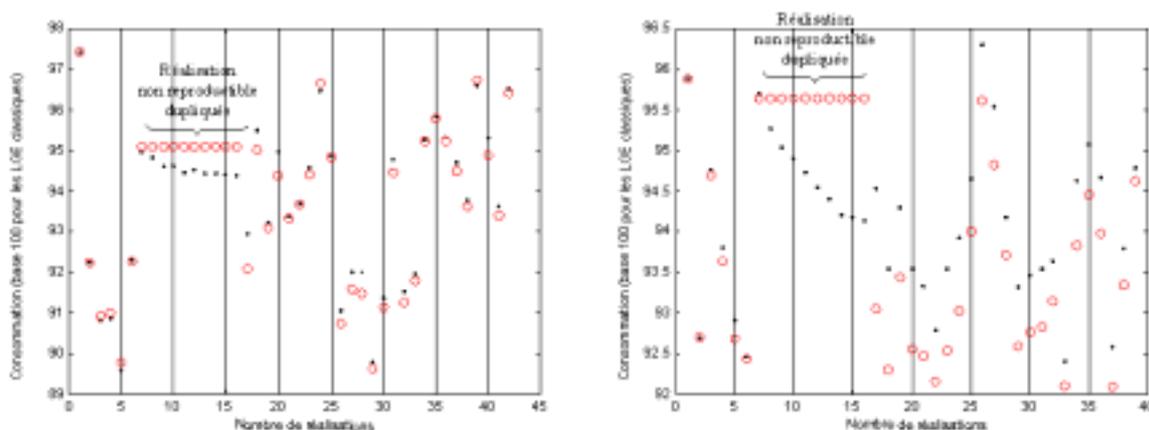


Figure V.14 – Consommation sans (noir) et avec (rouge) prise en compte de la reproductibilité pour l'ensemble des réalisations du parcours du matin (à gauche) et du parcours du soir (à droite).

¹⁸ Par exemple, lors de la mise en place d'une déviation pendant quelques semaines.

¹⁹ Equivalent à 2 semaines.

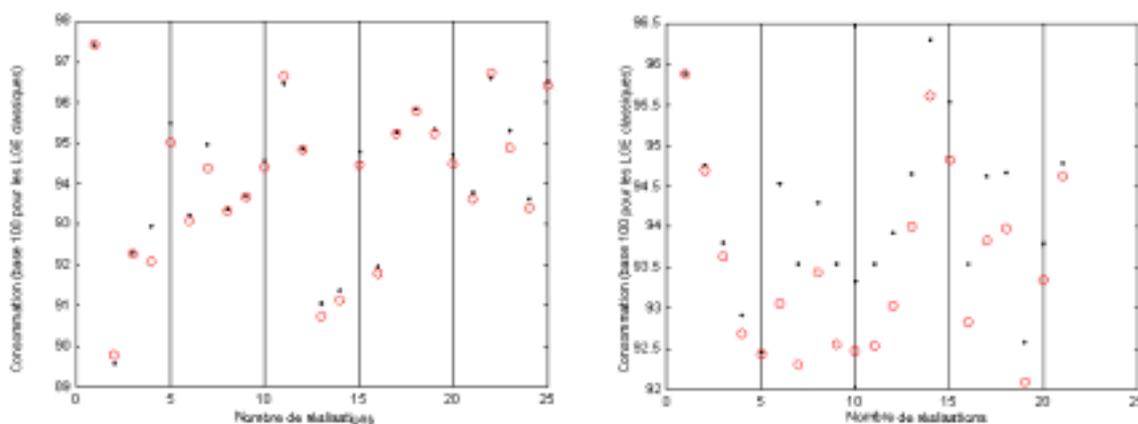


Figure V.15 – Consommation sans (noir) et avec (rouge) prise en compte de la reproductibilité uniquement pour les réalisations reproductibles du parcours du matin (à gauche) et du parcours du soir (à droite).

3.3.2 - Test d’une classification en deux classes.

Pour confirmer l’intérêt de la détection des réalisations non reproductibles, nous avons introduit un nombre plus important de réalisations non reproductibles pour le parcours du soir. Pour cela, nous avons interverti deux lignes de bus dans la moitié des réalisations du parcours soir. Cette modification permet de conserver la majorité des caractéristiques du parcours (distance, répartition des puissances électriques demandées,...), tout en constituant une perturbation temporelle très importante. Nous avons, ensuite, alterné un élément reproductible avec un élément non reproductible. Les résultats obtenus sont visualisés sur la Figure V.16 :

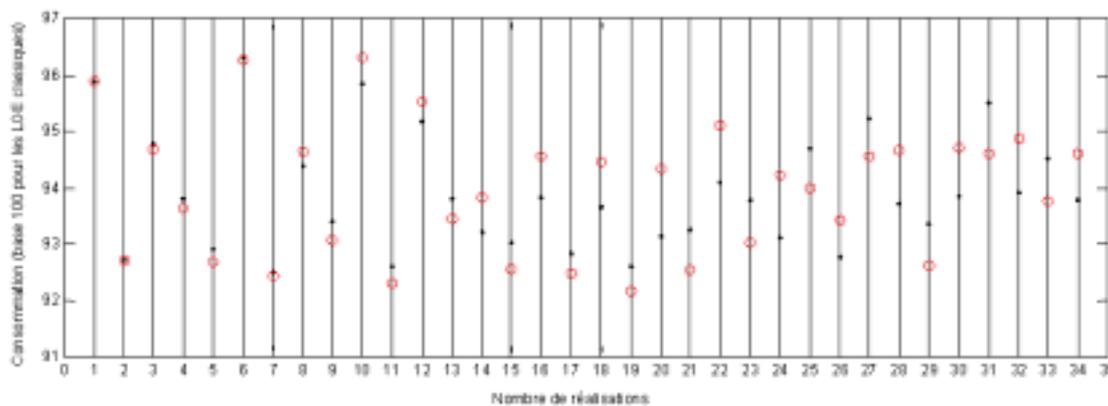


Figure V.16 – Consommation sans (noir) et avec (rouge) prise en compte de la reproductibilité en ne considérant qu’une seule classe.

Le système de détection des réalisations non reproductibles permet d’améliorer notablement la consommation du véhicule sur les réalisations reproductibles, par contre un profil d’état de charge de la batterie mal adapté est appliqué sur le reste des réalisations. Ce système serait plus intéressant

s'il était associé à un système de génération automatique de nouvelles classes qui permettrait d'obtenir les résultats de la Figure V.17. En effet, l'apprentissage de deux classes mélangées, non détectées par « la reconnaissance a priori » présenté dans le paragraphe 3.3.2, serait alors possible. Il s'agirait, par exemple, de détecter des rejets réguliers (rejet systématique de la réalisation correspondant à un jour spécifique de la semaine) ou des rejets systématiques de toutes les réalisations pendant une certaine période.

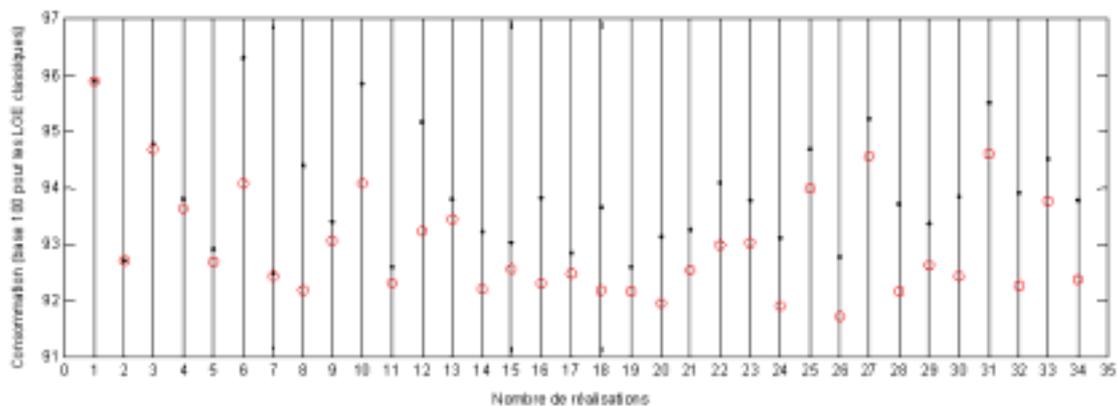


Figure V.17 – Consommation sans (noir) et avec (rouge) prise en compte de la reproductibilité en considérant deux classes.

3.3.3 - Remarque.

L'acquisition des connaissances est effectuée par moyennage des histogrammes de puissance électrique demandée calculés sur chaque cycle élémentaire. Dans ces conditions, nous ne faisons jamais intervenir le phénomène d'oubli. L'avantage de cette solution réside dans le fait que l'introduction, par erreur, d'une réalisation non reproductible dans les connaissances aura un poids négligeable, à condition bien évidemment que la classe contienne déjà un nombre suffisant d'éléments.

Dans ce cadre, l'intérêt majeur du système de détection des réalisations non reproductibles réside plus dans la possibilité de générer automatiquement de nouvelles classes que dans l'amélioration des connaissances acquises. En effet, nous pouvons supposer que certaines lignes de bus sont très fortement perturbées par les vacances scolaires. Nous pouvons donc envisager de détecter les vacances par l'obtention d'une succession de réalisations non reproductibles qui entraînera la création d'un nouveau parcours. A la rentrée, les réalisations devenues non reproductibles pour le parcours « vacances » pourront être comparées au parcours « école » et entraîner un nouveau basculement de parcours. Cette solution est préférable à une acquisition des connaissances faite avec l'oubli progressif des réalisations les plus anciennes, qui entraînera nécessairement le passage par un suivi de profil d'état de charge de la batterie intermédiaire aux deux situations « vacances » et « école ». Cette situation intermédiaire ne correspondant à aucune situation physique risque d'être néfaste du point de vue de la consommation du

véhicule. Bien évidemment, si une sauvegarde de parcours n’a pas été utilisée pendant un temps très long, il faudra quand même envisager l’oubli de ces connaissances afin de libérer de la mémoire pour l’apprentissage de parcours nouveaux. Un exemple d’algorithme considérant deux classes est présenté sur Figure V.18.

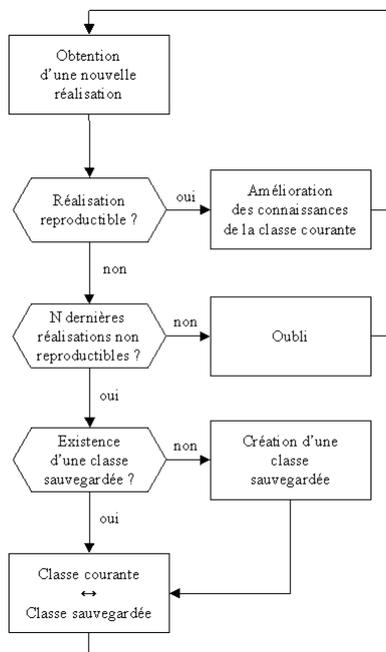


Figure V.18 – Exemple de la détection d’une succession de réalisations non reproductibles pour considérer deux classes.

Nous avons vu l’intérêt pour un bus hybride de prendre en compte dans les lois de gestion d’énergie le parcours suivi. L’existence de parcours reproductibles pour un bus est intuitivement évidente, mais qu’en est-il des autres véhicules hybrides ?

4 - Perspectives pour les autres véhicules hybrides.

Pour appliquer des méthodes évoluées de gestion de l’énergie, telle que celle présentée dans ce chapitre, à d’autres véhicules hybrides, deux solutions sont envisageables. Dans un premier temps, nous pouvons essayer de nous ramener à un problème proche de celui de bus en élargissant le domaine d’application à d’autres trajets reproductibles (parcours domicile-travail par exemple). Une autre piste pourrait consister à élargir les connaissances sur le parcours effectué en utilisant des systèmes de communication avec l’extérieur plus évolués que ceux envisagés jusqu’à présent. Ces deux points vont, maintenant, être évoqués dans les paragraphes ci-dessous.

4.1 - Les applications se rapprochant de celle du bus.

De nombreux véhicules effectuent régulièrement les mêmes parcours : on peut citer à titre d'exemple les véhicules de livraisons régulières (distribution de colis, de courrier,...). Pour l'ensemble des ces applications, le problème est quasiment identique à celui exposé pour le bus.

En ce qui concerne les véhicules des particuliers, de nombreux conducteurs font également régulièrement des parcours identiques, comme pour se rendre à leur travail. Dans ce cas, l'existence d'une reproductibilité des réalisations peut sembler plus incertaine, mais est certainement aussi présente. Des enregistrements, dont quelques éléments sont regroupés sur les figures V.18, V.19 et V.20, effectués par le personnel de Renault, ont permis de confirmer cette hypothèse. L'annexe 2 fournit plus d'informations sur ces enregistrements.

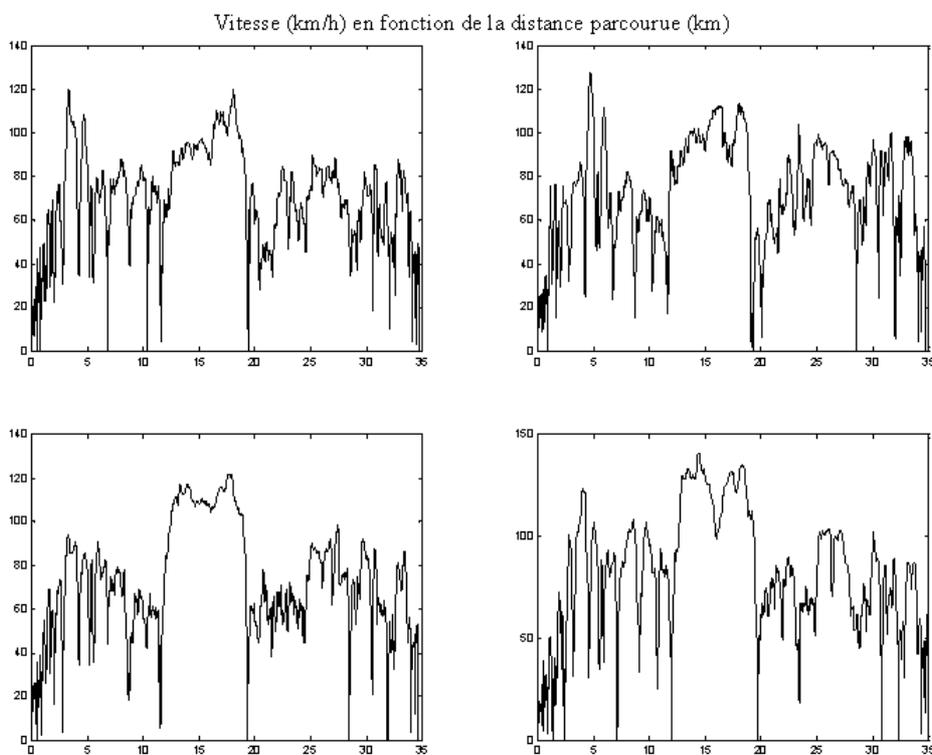


Figure V.19 – Quelques réalisations du parcours domicile-Technocentre du conducteur N°1.

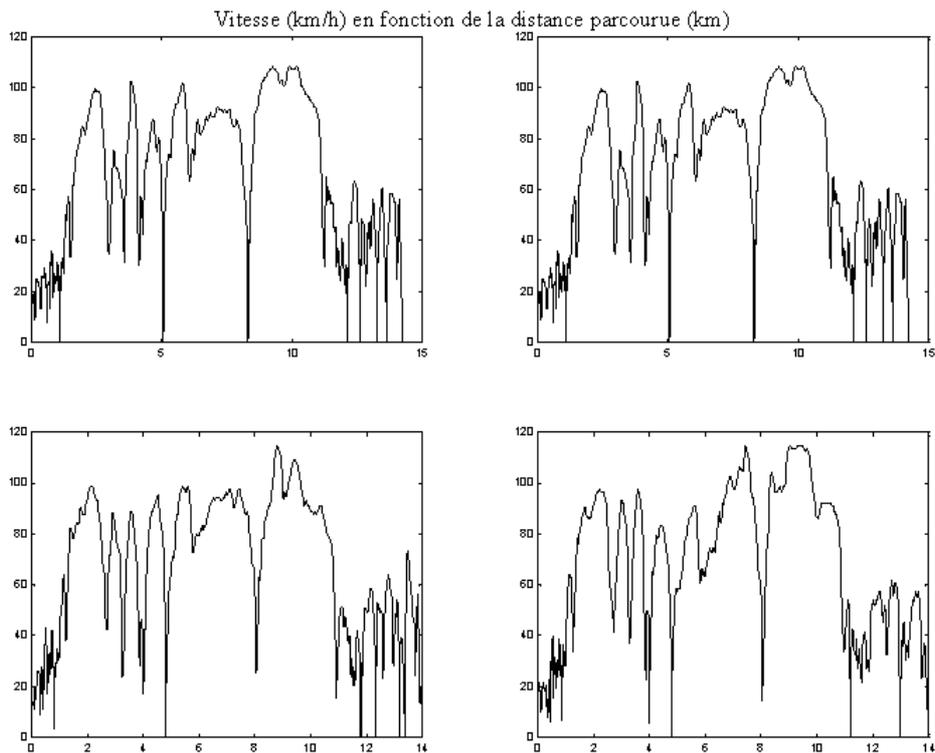


Figure V.20 – Quelques réalisations du parcours domicile-Technocentre du conducteur N°3.

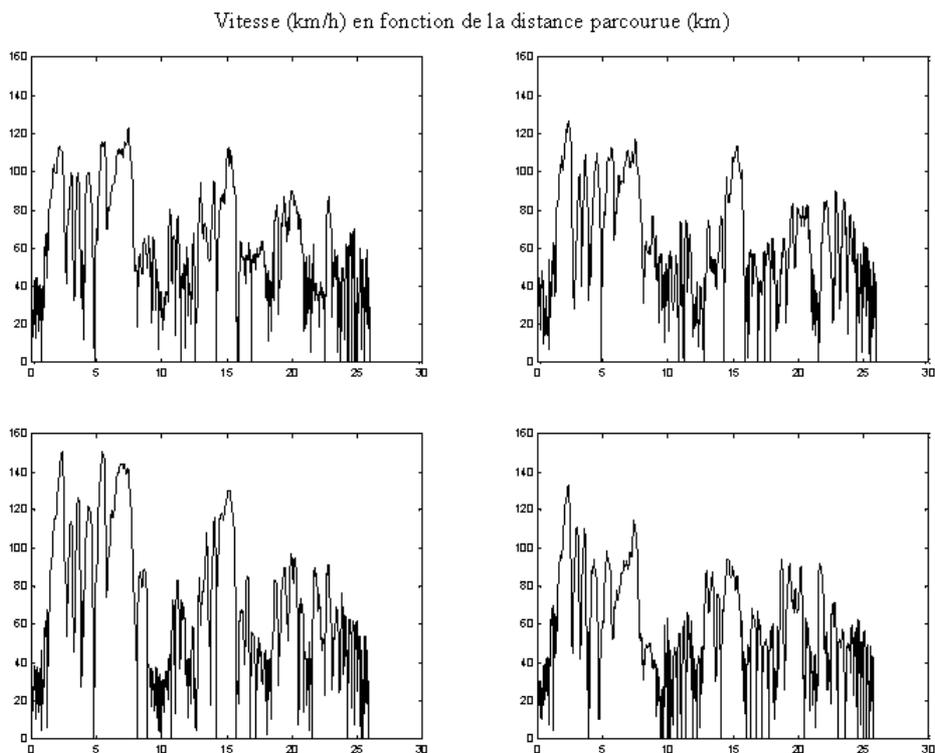


Figure V.21 – Quelques réalisations du parcours domicile-Technocentre du conducteur N°4.

Cependant, il semble intéressant d'envisager une méthode proche de celle développée et applicable à l'ensemble des parcours. Une piste de recherche peut apparaître dans ce domaine avec le développement à bord des véhicules de systèmes de communication évolués. Le paragraphe suivant présente les moyens de communications disponibles actuellement dans les véhicules et ceux envisagés dans le futur.

4.2 - Les systèmes de communication embarqués.

Tous les systèmes de communication embarqués sont basés sur un système de localisation du véhicule. Nous allons donc évoquer les différentes techniques de localisation avant de présenter les systèmes de navigation ou de guidage plus évolués. L'essentiel des informations présentées dans ce paragraphe est issu de [Zhao-Y, 1997] et de [Aurand-V, Balme-J, 2001].

4.2.1 - Les systèmes de localisation.

Trois principales techniques de localisation peuvent être distinguées :

∞ le positionnement par référence à plusieurs sites connus, dont le plus célèbre est le positionnement par satellites GPS²⁰, fournit un positionnement absolu du véhicule et continu dans la limite de couverture du moyen utilisé ; par contre, il nécessite des infrastructures très coûteuses et est sujet aux effets de masquage dans les zones urbaines, de forêt ou montagneuses ;

∞ le positionnement basé sur une estimation du déplacement, détermine le mouvement du véhicule à l'aide de capteurs cinématiques embarqués (odomètre, gyromètre, compas,...) ; il est peu coûteux mais ne fournit qu'un positionnement relatif qui dérive rapidement à cause du cumul des erreurs ;

∞ le positionnement par passage au droit d'un point connu, comme une balise fixe, fournit un positionnement intermittent mais absolu à condition de disposer des infrastructures associées lourdes à mettre en place et peu évolutives.

Des dispositifs associants des techniques de nature différente (positionnement par satellites associés à une estime) sont de plus en plus souvent envisagés pour améliorer le positionnement dans les applications automobiles. L'estime permet de conserver l'information lors des pertes de signal GPS et le GPS recale la position courante à chaque acquisition.

4.2.2 - Les systèmes de navigation.

Les systèmes de navigation réalisent la planification d'un itinéraire à partir d'une carte embarquée. Ils se décomposent en quatre modules :

∞ le système de positionnement décrit précédemment,

²⁰ Global Positioning System.

☞ la base de données cartographiques qui fournit des informations sur le type de route suivi, la signalisation routière, la vitesse recommandée...,

☞ le module de calcul de l'itinéraire, qui détermine le chemin optimal en terme de temps de parcours ou de distance en remettant à jour l'information en fonction de la progression du véhicule,

☞ l'interface de navigation.

La base de données cartographiques peut également servir pour le recalage du positionnement : on parle alors de map-matching. En France, l'inventaire de tous les grands axes routiers a déjà été effectué et toutes les communes sont identifiées. De plus, toutes les villes de plus de 100 000 habitants sont cartographiées précisément et ce travail est en cours de réalisation pour les villes de 30 000 à 100 000 habitants. Ce système s'étend également sur plusieurs pays européens. Dans le cadre de ces travaux, un tel système permettrait d'effectuer un découpage du parcours en cycles élémentaires plus efficace, l'itinéraire fourni par les systèmes de navigation étant déjà représenté sous forme de nœuds et de segments.

En plus des résultats précédents, ces systèmes fournissent des informations en temps réel sur le trafic (visualisation des embouteillages sur une carte, affichage de temps de parcours,...). Par exemple, sur Paris et sur certaines autoroutes, les temps de parcours sont calculés à partir de la mesure du nombre de véhicules traversant un point précis. Cependant, l'extension de ce type d'informations n'est pas garantie à cause du coût important de l'équipement de la chaussée. Lorsque ces données sont intégrées dans le calcul de l'itinéraire, on parle alors de guidage dynamique (les terminaux ne sont pas encore disponibles).

4.2.3 - Les véhicules traceurs.

Le principe des véhicules traceurs consiste à équiper une flotte de véhicules (véhicules DDE, taxis, transports en commun,...) d'un système de localisation qui transmet régulièrement sa position à un central. La consolidation de l'ensemble des données permet d'en déduire des informations sur les conditions de circulation.

Dans cette optique, toutes les informations disponibles sur un véhicule peuvent a priori être transmises à un central. Avec le développement de la technologie GSM²¹, une communication bidirectionnelle peut aussi être envisagée permettant la vente et l'achat d'informations avec ce central. Ces technologies ouvrent de nouvelles perspectives au développement de méthodes de supervision intelligentes telles que celle présentée dans ce mémoire.

²¹ Global System for Mobile Communications.

5 - Conclusion.

L'utilisation d'une base de données réaliste sur l'utilisation d'un bus hybride a permis de valider l'existence d'une reproductibilité des réalisations d'un même parcours en terme de profil d'état de charge de la batterie. Pour les deux parcours définis, nous avons obtenu des gains de l'ordre de 1 à 2% vis à vis de lois de gestion d'énergie déjà optimisées mais figées. Ces résultats sont très proches de la valeur théorique réalisable, correspondant au suivi du profil d'état de charge lié à la réalisation et non au parcours.

Nous avons, ensuite, défini la notion de reproductibilité des réalisations d'un même parcours par application de la méthode CART en distinguant trois classes : les réalisations reproductibles, celles ambiguës et celles non reproductibles. Nous avons alors obtenu une unique variable explicative de cette reproductibilité, l'erreur de suivi de SOC, et avons défini un seuil de séparation de la classe reproductible valable pour les deux parcours. Nous avons décidé de regrouper les classes ambiguës et non reproductibles pour n'intégrer dans l'acquisition des connaissances que des réalisations reproductibles. L'intégration de la notion de reproductibilité pourrait permettre de générer automatiquement de nouvelles classes de parcours, pour distinguer plusieurs classes dans une même classe fournie par le module de reconnaissance du parcours a priori.

Cette validation permet également d'ouvrir de nouvelles perspectives pour les lois de gestion d'énergie de tous les autres véhicules hybrides en envisageant les futurs systèmes de navigation qui étendraient la notion de parcours reproductibles à plusieurs véhicules.

BILAN ET PERSPECTIVES.

Avec ses deux sources d'énergie, le véhicule hybride dispose d'un degré de liberté pour répartir la demande du conducteur et donc optimiser sa consommation. En contrepartie, son fonctionnement en terme de consommation est beaucoup plus sensible au cycle suivi que le véhicule conventionnel. Nous nous sommes donc intéressés au développement de lois de gestion d'énergie embarquables dans un véhicule hybride et prenant en compte le parcours suivi.

Dans un premier temps, nous avons cherché à positionner nos travaux dans les différentes classes de véhicules hybrides et dans les lois de gestion d'énergie déjà disponibles. Pour cela, nous avons distingué trois classifications possibles de véhicules hybrides suivant :

- ∞ l'architecture du système de propulsion du véhicule,
- ∞ les différents modes de fonctionnement admissibles faisant intervenir une ou les deux sources d'énergie,
- ∞ le dimensionnement des organes donnant le poids relatif des deux sources.

Nous avons également défini plus précisément la notion de lois de gestion d'énergie et étudié l'historique de leur développement.

L'application concerne un véhicule de type hybride série : le moteur thermique n'étant plus lié aux roues, il est alors possible d'améliorer le rendement du générateur électrique (association du moteur thermique avec un alternateur), pour une puissance donnée, en choisissant la meilleure répartition {couple, régime} du point de vue de la consommation. En contrepartie, l'énergie issue du réservoir de carburant doit subir de nombreuses conversions avant d'atteindre les roues. Il est à noter que le choix de cette architecture n'est pas un point critique pour nos travaux, puisque la méthodologie présentée sera facilement extensible à toute autre architecture.

En ce qui concerne le dimensionnement des organes du véhicule, la conclusion sur la criticité des travaux est totalement différente puisque le gain attendu par l'application de lois de gestion d'énergie évoluées lui est très lié. En effet, les véhicules hybrides très proches des véhicules électriques ou des véhicules thermiques conventionnels ne nécessitent pas la mise en place d'une gestion d'énergie spécifique puisque leur comportement est très proche de celui de véhicules disposant d'une seule source d'énergie. Ces réflexions se sont traduites par le développement d'un modèle complet de bus hybride sous MATLAB/SIMULINK. Le véhicule dispose d'un moteur diesel légèrement sous-dimensionné vis-à-vis d'un véhicule conventionnel et d'une batterie fournissant une centaine de kilowatts pour ne pas dégrader les performances du véhicule et disposant d'une énergie suffisante pour permettre une autonomie électrique de quelques kilomètres.

Ensuite, l'étude a consisté à définir une méthodologie de développement de lois de gestion d'énergie embarquables mais figées²² pour les véhicules hybrides. Cette méthodologie se décompose en quatre étapes :

²² c'est-à-dire ne prenant pas en compte le parcours suivi.

- ∞ la formalisation du problème d'optimisation à l'aide de modèles très simplifiés des composants (du générateur électrique et de la batterie pour cette application),
- ∞ la résolution par le principe du maximum de Pontryaguine, définissant un unique paramètre de commande de répartition de la demande K ,
- ∞ la définition d'une stratégie en-ligne en modifiant le paramètre K pour asservir l'état de charge de la batterie et stabiliser ce dernier autour d'une valeur moyenne,
- ∞ l'ajout après l'optimisation de « lois de confort » instantanées pour rendre le résultat acceptable par un conducteur de véhicule conventionnel.

Ces lois ont été validées sur le modèle de simulation développé dans l'étape précédente.

Nous disposons ainsi de lois de gestion d'énergie embarquables pour un bus hybride. Il nous reste à intégrer la prise en compte du parcours effectué pour améliorer la consommation du véhicule. Ceci est réalisé en développant une stratégie de détermination du paramètre K en-ligne plus évoluée. Nous avons modifié la valeur de K pour faire suivre à la batterie un profil d'état de charge désiré SOC^* dépendant du parcours effectué (« suivi de SOC »). La prise en compte de ce parcours spécifique se décompose donc en plusieurs éléments :

- ∞ la reconnaissance du parcours a priori (non traité dans le cadre de ces travaux),
- ∞ la détermination du profil d'état de charge associé au parcours reconnu,
- ∞ l'exécution du parcours (faisant intervenir à la fois la commande instantanée décrite dans le paragraphe précédent et le suivi de SOC),
- ∞ l'évaluation de la reproductibilité de cette réalisation permettant soit de générer automatiquement un nouveau parcours, soit d'améliorer les connaissances sur celui-ci, soit d'oublier définitivement le résultat obtenu.

Cette dernière étape a nécessité, avant d'être étudiée, de définir la notion de reproductibilité, c'est-à-dire de déterminer une ou plusieurs variables explicatives pertinentes pour les parcours.

Enfin, nous avons validé ces nouvelles lois de gestion d'énergie à partir d'une base d'essais réalisée sur un véhicule conventionnel en condition normale de fonctionnement. Nous avons pu ainsi confirmer l'existence d'une reproductibilité des réalisations d'un même parcours du point de vue de l'état de charge de la batterie. L'utilisation de cette reproductibilité s'est traduite par un gain de 1 à 2% vis à vis de lois de gestion d'énergie déjà optimisées mais figées.

Ces travaux permettent d'ouvrir de nouvelles perspectives sur la gestion de l'énergie à bord d'un véhicule, à la fois pour les véhicules réalisant régulièrement les mêmes parcours, et pour les véhicules particuliers équipés d'un système de navigation évolué. De plus, la notion de gestion de l'énergie peut facilement être élargie à d'autres applications automobiles que le véhicule hybride. En effet, avec l'introduction de nouveaux équipements tels que ceux liés au confort thermique (climatisation de plus en plus performante, siège et volant chauffants, dégivrage rapide du pare-brise et de la lunette arrière,...) ou à la sécurité active (ABS, aide au freinage d'urgence,...), le besoin d'énergie se fait de plus en plus ressentir dans les véhicules. L'augmentation de ce besoin énergétique s'accompagne généralement d'une apparition de degrés de liberté supplémentaires issus de possibilités accrues de pilotage des organes. Pour résoudre ce problème, la première idée consiste bien évidemment à optimiser instantanément le fonctionnement de chaque organe pour limiter son impact en terme de consommation. Cependant, une nouvelle stratégie pourrait être de prendre en compte l'ensemble des consommateurs pour effectuer l'optimisation, voir d'envisager des délestages temporaires de certains organes de confort. L'objectif recherché consiste, comme pour la gestion des véhicules hybrides, à préférer une optimisation globale du système plutôt qu'une optimisation instantanée.

BIBLIOGRAPHIE.

[An-F, Barth-M, 1998] :

Critical issues in quantifying hybrid electric vehicle emissions and fuel consumption.

SAE Future Transportation Technology Conference and Exposition, 11-14/08/1998, Costa Mesa, Californie, USA, Technical Paper N° 981902.
Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.

[An-F, Barth-M, Scora-G, 1997] :

Impacts of Diverse Driving Cycles on Electric and Hybrid Electric Vehicle Performance.

SAE Future Transportation Technology Conference and Exposition, 06-08/08/1997, San Diego, Californie, USA, Technical Paper N°972646.
Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.

[Anderson-C, Pettit-Erin, 1995] :

The Effects of APU Characteristics on the Design of Hybrid Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles.

SAE International Congress and Exposition, 27/02-02/03/1995, Detroit, Michigan, USA, Technical Paper N°950493.
Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.

[André-M, 1998] :

Construction de cycles de conduite représentatifs pour la mesure des émissions de polluants des véhicules.

Rapport de thèse, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, France.

[Ansaldi-N, 2001] :

Présentation de la méthode CART.

Rapport interne Renault.

[Assemat-C, Briaud-S, Fauvel-F, 1998] :

Diagnostic flou d'environnement, de trait et d'état de conduite.

Rapport interne Renault.

[Athans-M, Falb-P, 1966] :

Optimal control. An introduction to the theory and its applications.

Edition Mc Graw-Hill Book Company

[Aurand-V, Balme-J, 2001] :

Les techniques de localisation des véhicules.

Edition Certu.

[Baumann-B, Washigton-G, Glenne-B, Rizzoni-G, 2000] :

Mechatronic Design and Control of Hybrid Electric Vehicles.

IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 5, N°1, mars 2000, pp. 58-72.

IEEE, Piscataway, New Jersey, USA.

[Baumann-B, Rizzoni-G, Washington-G, 1998] :

Intelligent Control of Hybrid Vehicles using Neural Networks and Fuzzy Logic.

SAE International Congress and Exposition, 23-26/02/1998, Detroit, Michigan, USA, Technical Paper N°981061.

Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.

[Béguery-P, Dubray-A, 2000] :

Procédé et système de gestion de l'énergie dans un véhicule à moyen de propulsion hybride.

Brevet FR2811268.

[Béguery-P, Hémédinger-S, 1999] :

Procédé et système pour déterminer le couple de consigne d'un groupe motopropulseur.
Brevet FR2789633.

[Bhatikar-S, Mahajan-R, Wipke-K, et al., 2000-01-1564] :

Artificial-neural-network-based energy storage system modeling for hybrid electric vehicles.
2000 Future Car Congress, 02-06/04/2000, Arlington, Virginie, USA, Technical Paper N°2000-01-1564.
Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.

[Borgeaud-y, Hémédinger-S, Caillard-B, et al., 1997] :

Véhicule automobile à motorisation hybride.
Brevet FR2770808.

[Bourne-C, Faithfull-P, Quigley-C, 1996] :

Implementing Control of a Parallel Hybrid Vehicle.
International Journal of Vehicle Design, vol.17, n°.5-6, pp. 649-62.

[Bouwman-R, 2001] :

Phileas a modern 24 metre HYBRID Public Transport Vehicle.
The 18th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, 20-24/10/2001, Berlin, Allemagne.

[Breiman-L, Friedman-J, Olshen-R et al., 1984] :

Classification and Regression Trees.
Edition Chapman & Hall/CRC.

[Brigham-D, Giardini-S, Lev-A et al., 1998] :

Method for Controlling Energy Flow in a Hybrid Electric Vehicle.
Brevet US5820172.

[Brunner-H, Winger-A, 1999] :

Energy Consumption of Hybrid Vehicles.
Proceedings of the 2001 Global Powertrain Congress, 5-7/10/1999, Stuttgart, Allemagne.

[Ceyzériat-F, 2000] :

Modélisation des auxiliaires des véhicules électriques hybrides CIVIS.
Auxirbat, Saint Priest, France, rapport interne Renault.

[Chauvelier-E, 1998] :

Procédé de commande d'un véhicule hybride à transmission électrique série.
Brevet FR2783768.

[Chauvelier-E, 1999] :

Procédé de commande d'un système de traction du type « hybride parallèle », notamment pour véhicule automobile, et dispositif de mise en œuvre de ce procédé.
Brevet FR2790427.

[Chauvelier-E, 2000] :

Groupe motopropulseur d'un véhicule hybride et son procédé de commande.
Brevet FR2809352.

[Chauvelier-E, Coulon-JF, 2000] :

Procédé de commande d'un véhicule hybride à transmission électrique.
Brevet FR2809998.

[Chauvelier-E, Coutier-T, 1999] :

Procédé de commande d'un véhicule hybride.
Brevet FR2799163.

[Chauvelier-E, Hémédinger-S, Pannequin-W, 1999] :

Procédé de gestion de l'énergie et véhicule à propulsion hybride.
Brevet FR2790428.

[Chauvelier-E, Sahroui-O, 1998] :

Groupe motopropulseur comportant un moteur thermique régulé en couple et en vitesse.
Brevet FR2783763.

[Coz-E, 2002] :

Développement d'une méthode d'apprentissage de parcours reproductibles.
Rapport de stage de fin d'études ENSIEG (INPG).

[Delprat-S, Paganelli-G, Delhom-M, et al., 1999] :

Algorithmic Optimization Tool for Evaluation of HEV Control Strategies.
The 16th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, 12-15/10/1999,
Beijing, Chine.

[Delprat-S, Guerra-TM, Rimaux-J, 2001] :

Optimal Control of a Parallel Powertrain : from Global Optimization to a Real Time Control Strategy.
The 18th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, 20-24/10/2001,
Berlin, Allemagne.

[Drozd-P, Fitzpatrick-N, Ghelesel-A, et al., 1996] :

A Hybrid Natural Gas Electric Fleet Vehicle.
SAE Future Transportation Technology Conference and Exposition, 05-08/08/1996,
Vancouver, Canada, Technical Paper N°961657.
Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.

[Duoba-M, Larsen-R, LeBlanc-N, 1996] :

Design Diversity of HEVs with Example Vehicles from HEV Competitions.
SAE International Congress and Exposition, 26-29/02/1996, Detroit, Michigan,
USA, Technical Paper N°960736.
Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.

[Duoba-M, Larsen-R, 1998] :

Investigation of Practical HEV Test Procedures with Prototypes from the 1997 FutureCar Challenge.
SAE International Congress and Exposition, 23-26/02/1998, Detroit, Michigan,
USA, Technical Paper N°981080
Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.

[Farall-S, 1993] :

A Study in the use of Fuzzy Logic in the Management of an Automotive heat Engine/Electric Hybrid Vehicle Powertrain.
Rapport de thèse, Warwick University, Warwick, Royaume Unis.

[Furutani-M, 1996] :

Controller for Hybrid Electric Vehicle.
Brevet US5495906.

[Galdi-V, Ippolito-L, Vaccaro-A, 2001] :

Optimisation of Energy Flow Management in Hybride Electric Vehicles via Genetic Algorithms.
Proceedings of 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Como, Italie, 08-12/07/2001.

[Gao-Y, Chen-L, Ehsani-M., 1999] :

Investigation of the effectiveness of regenerative braking for EV and HEV.
Future Transportation Technology Conference and Exposition, 17-19/08/1999,
Costa Mesa, Californie, USA, Technical Paper N°1999-01-2910.
Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.

[Glenn-B, Washington-G, Rizzoni-G, 2000] :

Operation and control strategies for hybrid electric automobiles.
2000 Future Car Congress, 02-06/04/2000, Arlington, Virginie, USA, Technical
Paper N° 2000-01-1537.
Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.

[He-X, 2001] :

Battery modeling for HEV simulation model development.
SAE 2001 World Congress, 05-08/03/2001, Detroit, Michigan, USA, Technical
Paper N°2001-01-0960.
Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.

[Heath-RPG, 1997] :

HYZEMLIB user's guide.
Ricardo Consulting Engineers Ltd, Sussex, Royaume Uni, rapport interne Renault.

[Hémédinger-S, Babani-P, 1999] :

Procédé de gestion d'un démarrage d'un moteur thermique par ordinateur.
Brevet FR2791391.

[Hisada-H, Moroto-S, 1998] :

Hybrid Vehicle with Battery Charge Control relative to a Driving Route.
Brevet US5778326.

[Hochgraf-C., Ryan-M, Wiegman-H, 1996] :

*Engine Control Strategy for a Series Hybrid Electric Vehicle incorporating Load-
Leveling and Computer Controlled Energy Management.*
SAE International Congress and Exposition, 26-29/02/1996, Detroit, Michigan,
USA, Technical Paper N°960230.
Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.

[Ibaraki-R, 1998] :

Control System for Hybrid Vehicle.
Brevet EP0822114.

[Ibarki-R, Taga-Y, Haga-H, et al., 1997] :

*Hybrid Vehicle Control with Selection of Drive Mode according to Energy
Conversion Efficiency in Electric Drive.*
Brevet EP0759370.

[Ibarki-R, Taga-Y, Haga-H, et al., 1997] :

Hybrid Vehicle Controller.
Brevet EP0769402.

[Jalil-N, Kheir-N, Salman-M, 1997] :

A Rule-Based Energy Management Strategy for a Series Hybrid Vehicle.
American Control Conference, 04-06/06/1997, Albuquerque, Nouveau Mexique,
USA, vol. 1, pp. 689-693.
IEEE, Piscataway, New Jersey, USA.

[Johnson-V, Wipke-K, Rausen-D, 2000] :

HEV Control Strategy for Real-Time Optimization of Fuel Economy and Emissions.

2000 Future Car Congress, 02-06/04/2000, Arlington, Virginie, USA, Technical Paper N°2000-01-1543.

Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.

[Khuwatsamrit-Suang, Schieman-R, 2000] :

Operating a 12-meter hybrid-electric bus in Bangkok

SAE Future Transportation Technology Conference, 21-23/08/2000, Costa Mesa, Californie, USA, Technical Paper N°2000-01-3107

Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.

[Kim-C, NamGoong-E, Lee-Sl, et al., 1999] :

Fuel Economy Optimization for Parallel Hybrid Vehicles with CVT.

SAE International Congress and Exposition, 01-04/03/1999, Detroit, Michigan, USA, Technical Paper N°1999-01-1148

Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.

[Koeneman-P., McAdams-D., 1998] :

Load leveling device selection for hybrid electric vehicles.

SAE International Congress and Exposition, 23-26/02/1998, Detroit, Michigan, USA, Technical Paper N°981130.

Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.

[Koo-E, Lee-H, Sul-S, et al., 1998]

Torque Control Strategy for a Parallel Hybrid Vehicle using Fuzzy Logic.

IEEE Industry Applications Conference, 12-15/10/1998, St Louis, Missouri, USA, vol. 3, pp. 1715-1720

IEEE, Piscataway, New Jersey, USA.

[Kumagai-N, Motooka-A, Takeda-N et al., 2001] :

Super HEV system for super low floor city-bus

SAE 2001 World Congress, 05-08/03/2001, Detroit, Michigan, USA, Technical Paper N° 2001-01-0956

Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.

[Leitmann-G, 1966] :

An Introduction to Optimal Control.

Edition Mc Graw-Hill Book Company.

[Méaude-N, 2001] :

Modélisation et commande de groupe moto-propulseurs à basse consommation : exemple de problèmes d'automatique des systèmes hybrides.

Rapport de thèse, Université Paris IX UER Mathématiques de la Décision, Paris, France.

[Morita-K, Shimamura-K, Iwai-N, et al., 2001] :

Fuel Economy and Exhaust Test Procedure for Hybrid Electric Vehicles-Comparison of Continuous Repeating Mode, Linear Approximation and SAE J1711.

The 18th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, 20-24/10/2001, Berlin, Allemagne.

[Pontriaguine-L, Boltianski-V, Gamkrelidze-R, et al., 1974] :

Theorie mathématique des processus optimaux.

Edition Mir.

[Maggetto-G, Van-Mierlo-J, 2000] :

Electric and Electric Hybrid Vehicle Technology : a Survey.

IEE Seminar on Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles, 11/04/2000, Durham, Royaume Unis, pp. 1-11

IEE, London, Royaume Unis.

[Méaude-N, 2001] :

Modélisation et commande de groupes moto-propulseurs à basse consommation : exemple de problèmes d'automatique des systèmes hybrides.

Rapport de thèse, Université Paris IX Dauphine, UER Mathématiques de la Décision, Paris, France.

[Quigley-C, Ball-R, Vinsome-A, et al., 1995] :

Predicting the Use of a Hybrid Electric Vehicle.

Intelligent Components for Autonomous and Semi-Autonomous Vehicles, 25-26/10/1995, Toulouse, France, pp. 129-34.

Pergamon, Oxford, Royaume Unis.

[Quigley-C, Ball-R, Vinsome-A, et al., 1996] :

Predicting Journey Parameters for the Intelligent Control of a Hybrid Electric Vehicle.

IEEE International Symposium on Intelligent Control, 15-18/09/1996, Dearborn, Michigan, USA, pp. 102-407.

IEEE, Piscataway, New Jersey, USA.

[Rizzoni-G, Guezennec-Y, Brahma-A et al., 2000] :

VP-SIM: A unified approach to energy and power flow modeling simulation and analysis of hybrid vehicles.

2000 Future Car Congress, Arlington, 02-06/04/2000, Virginie, USA, Technical Paper N°2000-01-1565.

Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.

[Rousseau-A, Sharer-P, Pasquier-M, 2001] :

Validation process of a HEV system analysis model: PSAT.

SAE 2001 World Congress, 05-08/03/2001, Detroit, Michigan, USA, Technical Paper N°2001-01-0953.

Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.

[Salman-M, Schouten-N, Kheir-N, 2000] :

Control strategies for parallel hybrid vehicles.

American Control Conference, 28-30/06/2000, Chicago, Illinois, USA, vol.1, pp. 524-528.

American Autom. Council, Danvers, Massachusetts, USA.

[Senger-R, Merkle-M, Nelson-D, 1998] :

Validation of ADVISOR as a simulation tool for a series hybrid electric vehicle.

SAE International Congress and Exposition, 23-26/02/1998, Detroit, Michigan, USA, Technical Paper N°981133.

Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.

[Tertois-S, Rat-JC, Tollis-C et al., 2000] :

Classification de types de conducteurs et d'environnement par réseaux de neurones.

Rapport interne Renault.

[Tuzuki-S, Moroto-S, Yamaguchi-K, et al., 1997] :

Hybrid Vehicle.

Brevet US5697466.

BIBLIOGRAPHIE.

[Takahiro-I, Shuzo-M, Hideki-N, 1999] :

Vehicle.

Brevet US5892346.

[West-J, 1997]

Hybrid Vehicles.

Automotive Environmental Impact and Safety Autotech Congress '97,
04-06/11/1997, Birmingham, Royaume Unis, Technical Paper 974170.

Institution of Mechanical Engineers, London, Royaume Unis.

[Zhao-Y, 1997]

Vehicle Location and Navigation Systems.

Edition The Artech Hous ITS Series.

BIBLIOGRAPHIE.

**ANNEXE A - LES PRINCIPAUX
THEOREMES DU PRINCIPE DU
MAXIMUM.**

Soit le système dynamique d'ordre n décrit par l'équation d'état A.1 :

$$\frac{dx}{dt} = f(x(t), u(t), t) \text{ avec } x(t_0) = x_0 \quad \text{équation A.1}$$

où l'état $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathfrak{R}_n$

la commande $u = (u_1, \dots, u_m) \in U$, sous-ensemble fixé de \mathfrak{R}_m

le temps $t \in (T_0, T_1)$

On définit également la fonction performance ou coût de la commande u par :

$$J(u) = \int_{t_0}^{t_1} L(x(t), u(t), t) dt \quad \text{équation A.2}$$

1 - Hypothèses générales.

1.1 - Hypothèses générales.

L'ensemble U des commandes admissibles est inclus dans l'ensemble des fonctions $u(t)$ continues par morceaux et bornées sur (T_0, T_1) telles que :

$$\forall t \in (T_0, T_1), \quad u(t) \in U \quad \text{et} \quad u(t-) = u(t) \quad \text{équation A.3}$$

U est fixé, c'est-à-dire qu'il ne dépend ni du temps, ni de l'état du système.

On fait également l'hypothèse que les fonctions $f_i(x, u, t)$, $\frac{\partial f_i}{\partial x}(x, u, t)$, $\frac{\partial f_i}{\partial t}(x, u, t)$

où $i = 1, 2, \dots, n$ et $L(x, u, t)$, $\frac{\partial L}{\partial x}(x, u, t)$, $\frac{\partial L}{\partial t}(x, u, t)$ sont continues sur $\mathfrak{R}_n \times \bar{U} \times (T_0, T_1)$

1.2 - Le problème de commande optimale.

Le problème de commande optimale consiste, pour le système d'équations défini, à déterminer la commande u de U qui minimise la fonction coût J . Si le temps n'apparaît pas explicitement dans les fonctions f et L , le problème est dit autonome. L'instant final t_1 peut être libre ou fixé, de même l'état final $x_1 = x(t_1)$ peut être libre ou imposé. Dans le cas où t_1 serait libre, une équation supplémentaire est donc nécessaire pour résoudre le problème (par exemple, pour résoudre les problèmes de commande en temps optimal), de même pour x_1 . Pour simplifier, dans le cas où x_1 serait libre, il n'a été considéré aucune contrainte sur x_1 . Il est cependant possible, moyennant quelques hypothèses supplémentaires, de limiter l'ensemble des états finaux ([Athans-M, Falb-P, 1966]).

L'Hamiltonien, $H(x,p,u,t)$, est la fonction à valeurs réelles des vecteurs x de dimension n , p de dimension n et u de dimension m définie par :

$$H(x,p,u,t) = -L(x,u,t) + \langle p, f(x,u,t) \rangle \quad \text{équation A.4}$$

où $L(x,u,t)$ et $f(x,u,t)$ ont été définies précédemment.

Par la suite, les variables correspondant à l'optimum seront notées $*$.

2 - Cas des problèmes autonomes (théorème 1).

Soit $u^*(t)$ une commande admissible telle que la trajectoire correspondante $x^*(t)$ soit issue du point x_0 à l'instant t_0 et s'achève par le point x_1 en t_1 . Pour que $u^*(t)$ soit une commande optimale vis-à-vis de J , il est nécessaire qu'il existe une fonction $p^*(t)$ telle que :

∞ $p^*(t)$ soit solution du système

$$\frac{dp^*}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x}[x^*(t), p^*(t), u^*(t)]$$

avec les conditions limites $x^*(t_0) = x_0$ et $x^*(t_1) = x_1$

∞ la fonction $H[x^*(t), p^*(t), u(t)]$, fonction de u , atteint un maximum absolu en $u^*(t)$ pour t dans (T_0, T_1) , c'est-à-dire :

$$\max_{u \in U} H[x^*(t), p^*(t), u] = H[x^*(t), p^*(t), u^*(t)]$$

∞ Si l'instant final t_1 est libre, la fonction $H[x^*(t), p^*(t), u^*(t)]$ doit satisfaire en plus la relation :

$$t_1 \in (T_0, T_1) \text{ et } \forall t \in [t_0, t_1] \quad H[x^*(t), p^*(t), u^*(t)] = 0$$

∞ Si l'état final x_1 est libre, on a :

$$x_1 \in \mathfrak{X}_n \text{ et } p^*(t_1) = 0$$

3 - Cas des problèmes non autonomes (théorème 2).

Soit $u^*(t)$ une commande admissible telle que la trajectoire correspondante $x^*(t)$ soit issue du point x_0 à l'instant t_0 et s'achève par le point x_1 en t_1 . Pour que $u^*(t)$ soit une commande optimale vis-à-vis de J , il est nécessaire qu'il existe une fonction $p^*(t)$ telle que :

∞ $p^*(t)$ soit solution du système

$$\frac{dp^*}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x}[x^*(t), p^*(t), u^*(t), t]$$

avec les conditions limites $x^*(t_0) = x_0$ et $x^*(t_1) = t_1$

∞ la fonction $H[x^*(t), p^*(t), u(t), t]$, fonction de u , atteint un maximum absolu en $u^*(t)$ pour t dans (T_0, T_1) , c'est-à-dire :

$$\max_{u \in U} H[x^*(t), p^*(t), u, t] = H[x^*(t), p^*(t), u^*(t), t]$$

∞ Si l'instant final t_1 est libre, la fonction $H[x^*(t), p^*(t), u^*(t), t]$ doit satisfaire en plus les relations :

$$t_1 \in (T_0, T_1)$$

$$H[x^*(t), p^*(t), u^*(t), t] = -\int_t^{t_1} \frac{\partial H}{\partial t}[x^*(\tau), p^*(\tau), u^*(\tau), \tau] d\tau$$

$$H[x^*(t_1), p^*(t_1), u^*(t_1), t_1] = 0$$

∞ Si l'état final x_1 est libre, on a :

$$x_1 \in \mathfrak{R}_n \text{ et } p^*(t_1) = 0$$

4 - Prise en compte d'un coût final dans la fonction coût (théorème 3).

4.1 - Définitions et hypothèses.

On suppose dans ce paragraphe que la fonction coût est de la forme :

$$J(u) = K(x(t_1), t_1) + \int_{t_0}^{t_1} L(x(t), u(t), t) dt \quad \text{équation A.5}$$

où $K(x, t)$ est une fonction à valeurs réelles sur $\mathfrak{R}_n \times X(T_0, T_1)$.

On fait également l'hypothèse que les fonctions $K(x, t)$, $\frac{\partial K}{\partial x}(x, t)$, $\frac{\partial K}{\partial t}(x, t)$,

$\frac{\partial^2 K}{\partial x^2}(x)$, $\frac{\partial^2 K}{\partial x \partial t}(x)$, $\frac{\partial^2 K}{\partial t^2}(x)$, sont continues sur $\mathfrak{R}_n \times X(T_0, T_1)$

4.2 - Résolution.

En remarquant que

$$K(x(t_1), t_1) = K(x(t_0), t_0) + \int_{t_0}^{t_1} \frac{d}{dt} \{K(x(t), t)\} dt$$

avec

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \{K(x(t), t)\} &= \left\langle \frac{\partial K}{\partial x}(x(t), t), \dot{x}(t) \right\rangle + \frac{\partial K}{\partial t}(x(t), t) \\ &= \left\langle \frac{\partial K}{\partial x}(x(t), t), f(x(t), u(t), t) \right\rangle + \frac{\partial K}{\partial t}(x(t), t) \end{aligned}$$

On obtient :

$$J(u) = K(x(t_0), t_0) + \int_{t_0}^{t_1} \left\{ L(x(t), u(t), t) + \left\langle \frac{\partial K}{\partial x}(x(t), t), f(x(t), u(t), t) \right\rangle + \frac{\partial K}{\partial t}(x(t), t) \right\} dt$$

Minimiser J revient donc à minimiser le critère

$$J_1(u) = \int_{t_0}^{t_1} \left\{ L(x(t), u(t), t) + \left\langle \frac{\partial K}{\partial x}(x(t), t), f(x(t), u(t), t) \right\rangle + \frac{\partial K}{\partial t}(x(t), t) \right\} dt$$

4.3 - Théorème.

On peut donc avec les hypothèses faites se ramener aux théorèmes précédents. En conservant les mêmes notations, on obtient le théorème ci-dessous.

Soit $u^*(t)$ une commande admissible telle que la trajectoire correspondante $x^*(t)$ soit issue du point x_0 à l'instant t_0 et s'achève par le point x_1 en t_1 . Pour que $u^*(t)$ soit une commande optimale vis-à-vis de J , il est nécessaire qu'il existe une fonction $p^*(t)$ telle que :

∞ $p^*(t)$ soit solution du système

$$\frac{dp^*}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x}[x^*(t), p^*(t), u^*(t), t]$$

avec les conditions initiales $x^*(t_0) = x_0$ et $x^*(t_1) = x_1$

∞ la fonction $H[x^*(t), p^*(t), u(t), t]$, fonction de u , atteint un maximum absolu en $u^*(t)$ pour t dans (T_0, T_1) , c'est-à-dire :

$$\max_{u \in U} H[x^*(t), p^*(t), u, t] = H[x^*(t), p^*(t), u^*(t), t]$$

∞ Si l'instant final t_1 est libre, la fonction $H[x^*(t), p^*(t), u^*(t), t]$ doit satisfaire en plus les relations :

$$t_1 \in (T_0, T_1)$$

$$H[x^*(t), p^*(t), u^*(t), t] = -\frac{\partial K}{\partial t}(x^*(t_1), t_1) - \int_t^{t_1} \left\{ \frac{\partial H}{\partial t}[x^*(\tau), p^*(\tau), u^*(\tau), \tau] + \frac{\partial^2 K}{\partial t^2}(x^*(\tau), \tau) \right\} d\tau$$

$$H[x^*(t_1), p^*(t_1), u^*(t_1), t_1] = -\frac{\partial K}{\partial t}(x^*(t_1), t_1)$$

∞ Si l'état final x_l est libre, on a :

$$x_l \in \mathfrak{R}_n$$

$$p^*(t_1) = \frac{\partial K}{\partial x}(x^*(t_1), t_1)$$

5 - Prise en compte de contraintes sur la commande dépendant de l'état (théorème 4).

5.1 - Le problème.

On a supposé jusqu'à présent que le sous-espace U de l'espace \mathfrak{R}_m des commandes était constant. Nous allons maintenant supposer que U dépend de l'état x du système, c'est-à-dire :

$$\forall t \in (T_0, T_1) \quad u(t) \in U(x(t)) \quad \text{équation A.6}$$

où $x(t)$ est solution de l'équation d'état du système

5.2 - Définitions et hypothèses.

On suppose que les fonctions $f_i(x, u)$, $\frac{\partial f_i}{\partial x}(x, u)$, $\frac{\partial f_i}{\partial u}(x, u)$ avec $i=1, 2, \dots, n$ sont continues sur $\mathfrak{R}_n \times \mathfrak{R}_m \times X(T_0, T_1)$.

$U(x)$ est défini par

$$\varphi_\alpha(x, u) = 0 \quad \alpha = 1, 2, \dots, l \quad \text{équation A.7}$$

$$\psi_\beta(x, u) \leq 0 \quad \beta = 1, 2, \dots, s \quad \text{équation A.8}$$

où $\varphi_\alpha(x,u), \frac{\partial \varphi_\alpha}{\partial x}(x,u), \frac{\partial \varphi_\alpha}{\partial u}(x,u), \psi_\beta(x,u), \frac{\partial \psi_\beta}{\partial x}(x,u), \frac{\partial \psi_\beta}{\partial u}(x,u)$

sont définies et continues sur $\mathfrak{X}_n \times \mathfrak{X}_m$.

Supposons que pour la commande optimale $u^*(t)$ associée à $x^*(t)$:

$$\psi_\beta(x,u) = 0 \quad \beta = 1, 2, \dots, r \quad r \leq s \quad \text{équation 0.9}$$

$$\psi_\beta(x,u) < 0 \quad \beta = r+1, r+2, \dots, s \quad \text{équation 0.10}$$

Notons $u^c = (u_1, u_2, \dots, u_{r+l})$ permettant de résoudre dans un voisinage de $(x^*(t), u^*(t))$ le système :

$$\varphi_\alpha(x,u) = 0 \quad \alpha = 1, 2, \dots, l \quad \text{équation 0.11}$$

$$\psi_\beta(x,u) = 0 \quad \beta = 1, 2, \dots, r \quad \text{équation 0.12}$$

On pose :

$$R = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_l, \psi_1, \psi_2, \dots, \psi_r) \quad \text{équation 0.13}$$

5.3 - Théorème.

Soit $u^*(t)$ une commande admissible telle que la trajectoire correspondante $x^*(t)$ soit issue du point x_0 à l'instant t_0 et s'achève par le point x_1 en t_1 . Pour que $u^*(t)$ soit une commande optimale vis-à-vis de J , il est nécessaire qu'il existe une fonction $p^*(t)$ telle que :

∞ $p^*(t)$ soit solution du système

$$\frac{dp^*}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x}[x^*(t), p^*(t), u^*(t), t] + v \cdot \frac{\partial R}{\partial x}$$

avec les conditions limites $x^*(t_0) = x_0$ et $x^*(t_1) = x_1$

où $v(t) = (v_1(t), v_2(t), \dots, v_{r+l}(t))$ est solution de

$$v(t) \cdot \frac{\partial R}{\partial u^c}[x^*(t), u^*(t)] = \frac{\partial H}{\partial u^c}[x^*(t), p^*(t), u^*(t)]$$

∞ la fonction $H[x^*(t), p^*(t), u(t)]$, fonction de u , atteint un maximum absolu en $u^*(t)$ pour t dans $[T_0, T_1]$, c'est-à-dire :

$$\max_{u \in U} H[x^*(t), p^*(t), u] = H[x^*(t), p^*(t), u^*(t)]$$

6 - Principe du maximum restreint (théorème 5).

6.1 - Le problème.

Dans tous les paragraphes précédents, seule la commande u était limitée au domaine U , le domaine des phases coïncidant avec \mathfrak{X}_n tout entier. Or pour de nombreux problèmes, la trajectoire $x(t)$ doit être située dans un domaine B donné et fixé par avance.

Si le domaine B est un ouvert de l'espace des phases, alors le problème de commande optimale est équivalent à l'un des problèmes décrits précédemment et il est possible d'appliquer l'un des énoncés du principe du maximum (la démonstration ne nécessite que la présence d'un voisinage de la trajectoire optimale). Ceci n'est plus possible quand B est un fermé et qu'au moins une partie de la trajectoire optimale est située sur le bord ∂B de B . On va donc s'intéresser, dans la suite au problème, au cas où une partie de la trajectoire est incluse entièrement dans ∂B .

6.2 - Définitions et hypothèses.

Soit t_e et t_s , les instants d'entrée et de sortie de la trajectoire optimale $x^*(t)$ sur la frontière ∂B , c'est-à-dire telle que

$$\forall t \in [t_e, t_s], \quad x^*(t) \in \partial B \quad \text{équation A.14}$$

L'ensemble B des états admissibles est défini de la façon suivante :

$$B = \{x \in \mathfrak{X}_n / g(x) \leq 0\} \text{ et } \partial B = \{x \in \mathfrak{X}_n / g(x) = 0\} \quad \text{équation A.15}$$

où $g(x)$ est une fonction possédant des dérivées partielles secondes continues dans un voisinage de ∂B et $\frac{\partial g}{\partial x}$ ne s'annule pas pour $x \in \partial B$.

L'ensemble U des commandes admissibles est donné par :

$$U = \{u \in \mathfrak{X}_n / \psi_\beta(u) \leq 0, \beta = 1, 2, \dots, s\} \quad \text{équation A.16}$$

où les fonctions $\psi_\beta(u)$, $\frac{\partial \psi_\beta(u)}{\partial u_k}$ avec $\beta = 1, 2, \dots, s$ et $k = 1, 2, \dots, m$ sont

définies et continues sur un voisinage de la frontière ∂U de U

Soit la fonction

$$\lambda(x, u) = \left\langle \frac{\partial g}{\partial x}, f(x, u) \right\rangle \quad \text{équation A.17}$$

Comme précédemment, on a pour la commande optimale $u^*(t)$ associée à $x^*(t)$ les équations VII.9 et VII.10 et on définit $u^c = (u_1, u_2, \dots, u_r)$ permettant de résoudre dans un voisinage de $(x^*(t), u^*(t))$ le système

$$\psi_\beta(x, u) = 0 \quad \beta = 1, 2, \dots, r \quad \text{équation A.18}$$

On définit également

$$R = (\lambda(x, u), \psi_1, \psi_2, \dots, \psi_r) \quad \text{équation A.19}$$

On suppose de plus que $\frac{\partial p(x, u)}{\partial u} \neq 0$ et $\frac{\partial p(x, u)}{\partial u}, \frac{\partial \psi_1(x)}{\partial u}, \dots, \frac{\partial \psi_r(x)}{\partial u}$ sont linéairement indépendants en $x = x^*$ et $u = u^*$.

On définit l'ensemble des commandes restreintes Ω par :

$$\Omega = \{u \in \mathfrak{R}_m / u \in U \text{ et } \lambda(x, u) = 0\} \quad \text{équation A.20}$$

De plus, les fonctions $f_i(x, u), \frac{\partial f_i}{\partial x}(x, u), \frac{\partial f_i}{\partial u}(x, u)$, avec $i = 1, 2, \dots, n$, et $L(x, u), \frac{\partial L}{\partial x}(x, u), \frac{\partial L}{\partial u}(x, u)$ sont définies et continues sur $\hat{B}X\hat{U}$ deux ouverts contenant respectivement B et U .

6.3 - Le principe du maximum restreint.

Soit $u^*(t)$ une commande admissible satisfaisant aux hypothèses précédentes telle que la trajectoire correspondante $x^*(t)$ appartienne à ∂B pour t compris entre t_e et t_s . Pour que $u^*(t)$ soit une commande optimale vis-à-vis de J , il est nécessaire qu'il existe une fonction $p^*(t)$ telle que :

∞ $p^*(t)$ soit solution du système

$$\frac{dp^*}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x}[x^*(t), p^*(t), u^*(t)] + v_0(t) \frac{\partial \lambda}{\partial x}(x^*(t), u^*(t))$$

où $v_0(t)$ est égale à la première composante du vecteur

$v(t) = (v_0(t), v_1(t), \dots, v_r(t))$ solution de

$$v(t) \cdot \frac{\partial R}{\partial u^c}[x^*(t), u^*(t)] = \frac{\partial H}{\partial u^c}[x^*(t), p^*(t), u^*(t)]$$

$$\infty \quad \max_{u \in \Omega} H[x^*(t), p^*(t), u] = H[x^*(t), p^*(t), u^*(t)]$$

$$\infty \quad H[x^*(t), p^*(t), u^*(t)] = 0$$

De plus, on a les propriétés suivantes (condition de saut) :

$$p^*(t_e - 0) = p^*(t_e)$$

$$p^*(t_s + 0) = p^*(t_s) - v_0(t_s) \frac{\partial g}{\partial x} [x^*(t_s)]$$

où $v_0(t)$ continue et négative sur $[t_e, t_s]$,

autrement dit, la fonction p^* est continue au point d'entrée et discontinue au point de sortie (la discontinuité est donnée par la condition de saut).

ANNEXE B - LES CYCLES UTILISES.

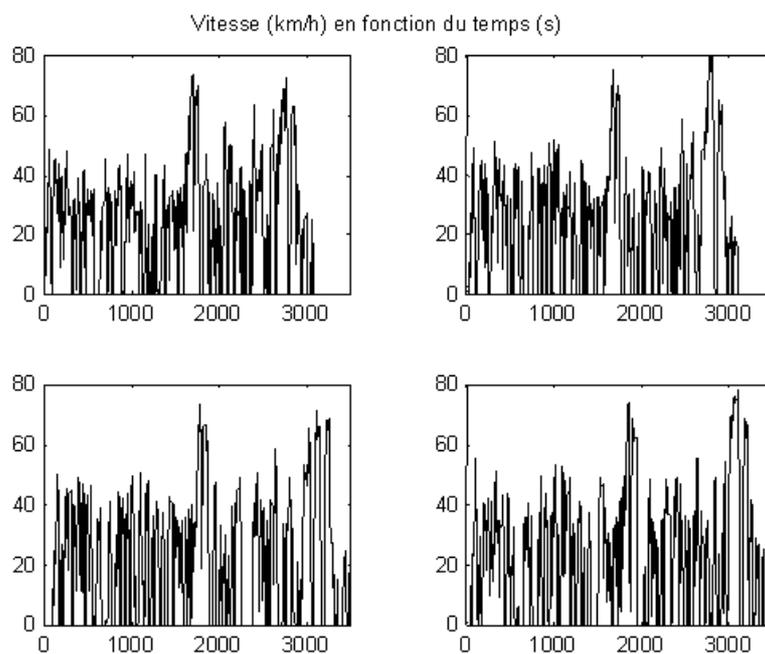


Figure B.3 – Visualisation des réalisations de la ligne N°1.

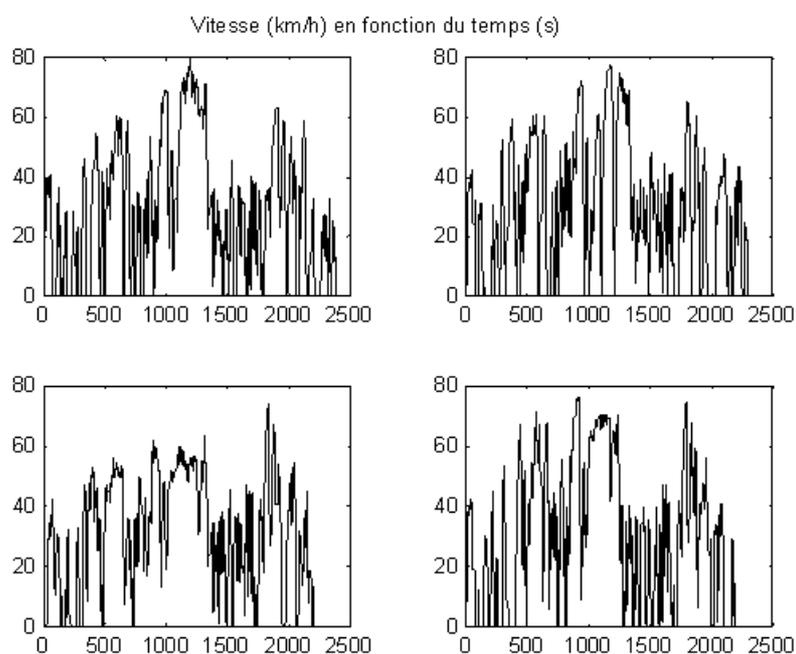


Figure B.4 – Visualisation des réalisations de la ligne N°2.

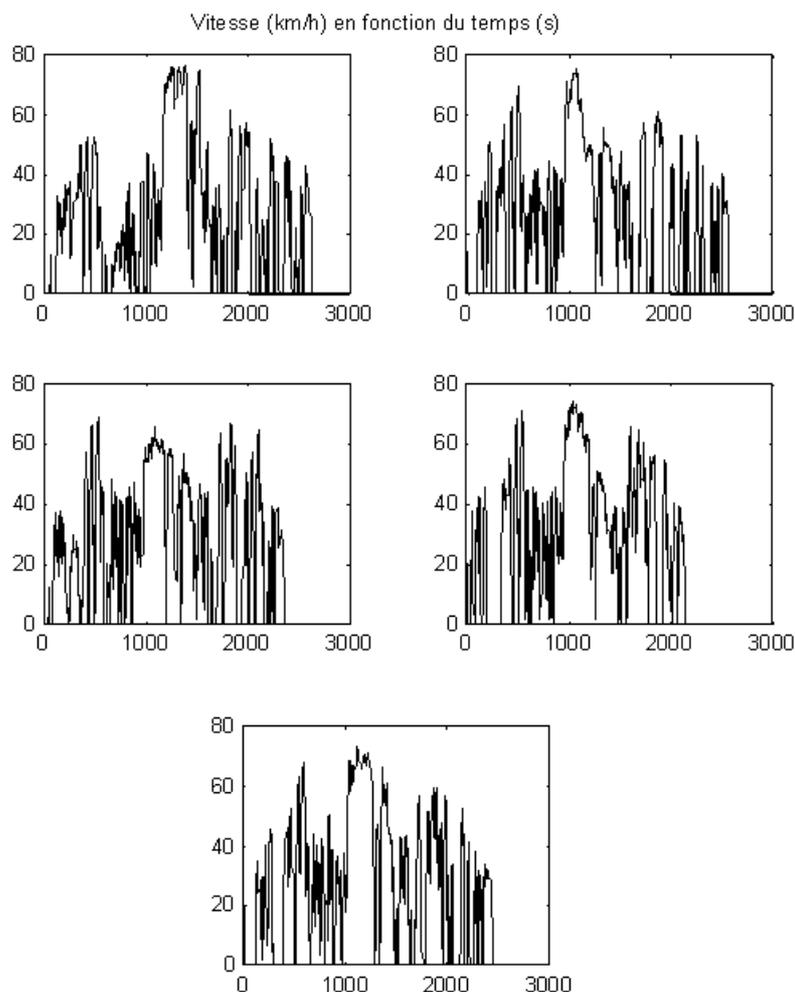


Figure B.5 – Visualisation des réalisations de la ligne N°3.

2 - Les « essais Laguna ».

La deuxième campagne d'essais a utilisé un véhicule conventionnel (une Laguna) pour réaliser des parcours reproductibles. Pour cela, le véhicule a été équipé d'un ordinateur portable qui a été relié à la prise diagnostic du véhicule. La vitesse a alors été récupérée sur le calculateur d'injection²³. Ce véhicule a permis deux types d'essais :

- ∞ l'obtention de plusieurs réalisations d'un même parcours de type « bus » sans contrainte de véhicule à suivre,

²³ Les variables enregistrées sont la vitesse du véhicule (km/h), la dépression altimétrique (mb), la pression collecteur absolue mesurée (mb), le régime moteur moyen (tr/min), la durée d'injection (μs), la température air (°C) et la température eau (°C).

☞ l'obtention de plusieurs réalisations de parcours domicile-travail.

2.1 - Essai « réalisation d'un parcours de type bus ».

Dans un premier temps, nous avons défini un parcours²⁴ de 55 kilomètres qui a été réalisé une vingtaine de fois. Les réalisations ont été faites majoritairement avec le même conducteur.

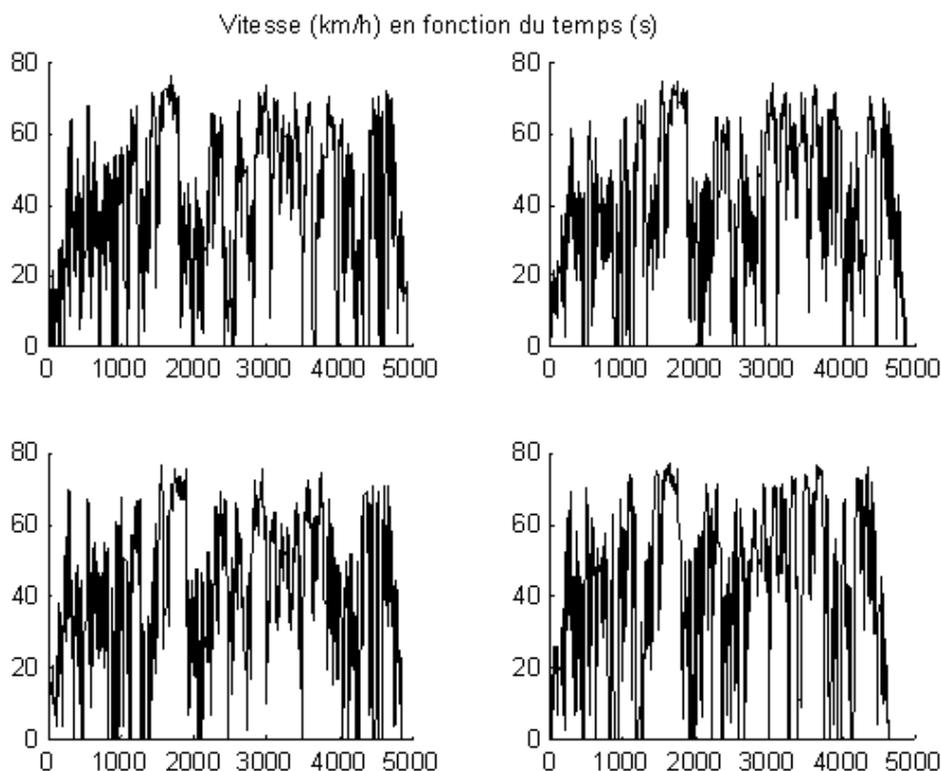


Figure B.6 – Visualisation de quelques réalisations du parcours défini.

Les profils de roulage obtenus ne sont pas représentatifs de l'utilisation d'un bus, principalement à cause des arrêts beaucoup moins fréquents et des accélérations du véhicule plus importantes dans cette étude. Par contre, la ressemblance des profils de vitesse apparaît assez clairement.

2.2 - Essai « réalisation de parcours domicile-travail ».

Le véhicule a également été utilisé pour enregistrer des profils de mission correspondant au parcours domicile-Technocentre de plusieurs

²⁴ Le parcours défini traverse les communes suivantes : Guyancourt, Montigny le Bretonneux, Magny-les-Hameaux, Saint Rémy-lès-Chevreuse, Chevreuse, Dampierre-en-Yvelines, Le Mesnil-St-Denis, Trappes, Guyancourt.

conducteurs²⁵. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau ci-dessous et un exemple de réalisation de chaque parcours est visualisé sur les figures B.7 à B.14.

	Longueur du parcours	Nombre de réalisations
Conducteur N°1	35 km	17 allers
	31 km	16 retours
Conducteur N°1'	34 km	16 allers
	31 km	15 retours
Conducteur N°2	27 km	6 allers
	27 km	5 retours
Conducteur N°2'	27 km	5 allers
	27 km	5 retours
Conducteur N°3	14 km	6 allers
	11 km	7 retours
Conducteur N°4	26 km	5 allers
	24 km	6 retours
Conducteur N°5	32 km	2 allers
	31 km	5 retours
Conducteur N°6	39 km	4 allers
	39 km	4 retours

Tableau B.1 – Récapitulatif de la base d’essais obtenue.

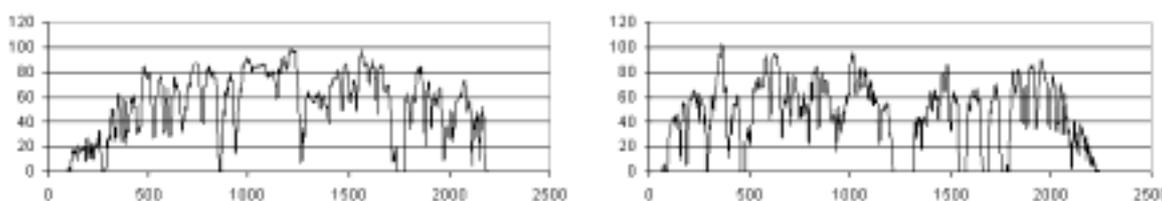


Figure B.7 – Visualisation d’une réalisation de chaque parcours du conducteur N°1.

²⁵ D’autres cycles du même type (parcours domicile-Technocentre) issus de précédentes campagnes d’essais sont également disponibles.

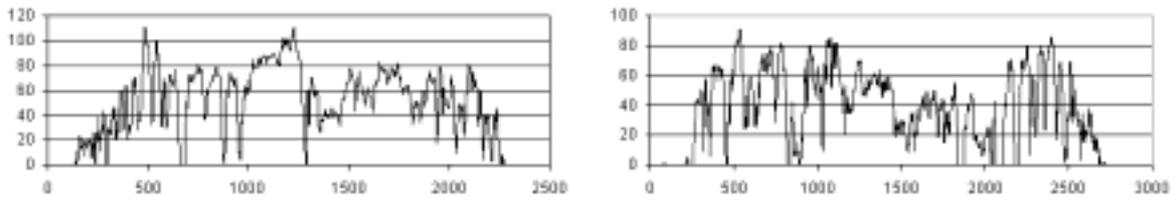


Figure B.8 – Visualisation d’une réalisation de chaque parcours du conducteur N°1’.

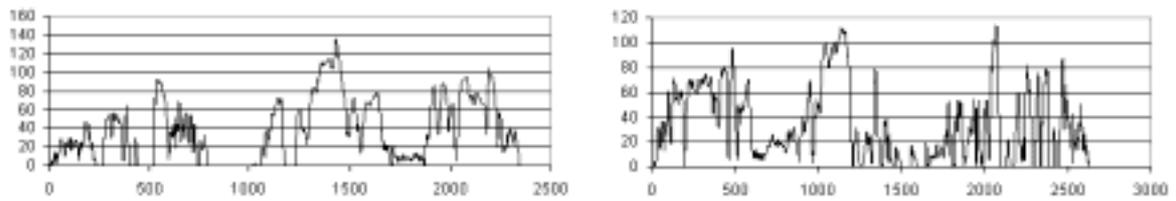


Figure B.9 – Visualisation d’une réalisation de chaque parcours du conducteur N°2.

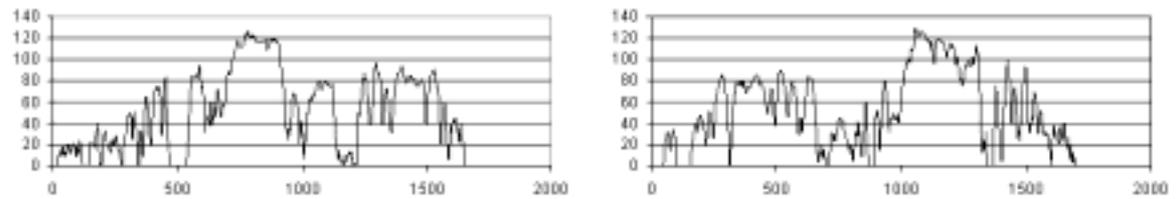


Figure B.10 – Visualisation d’une réalisation de chaque parcours du conducteur N°2’.

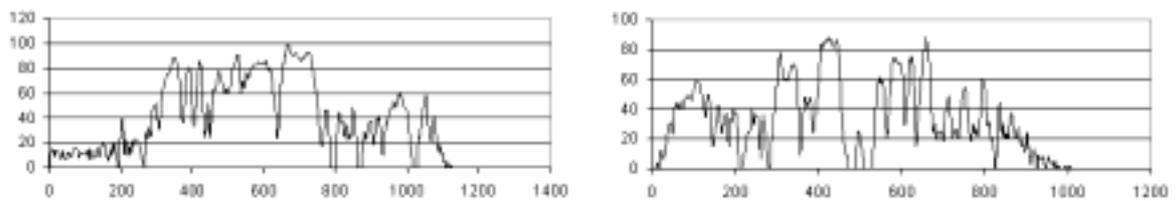


Figure B.11 – Visualisation d’une réalisation de chaque parcours du conducteur N°3.

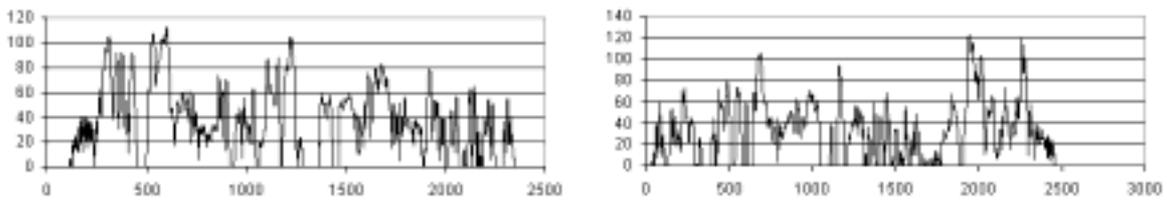


Figure B.12 – Visualisation d’une réalisation de chaque parcours du conducteur N°4.

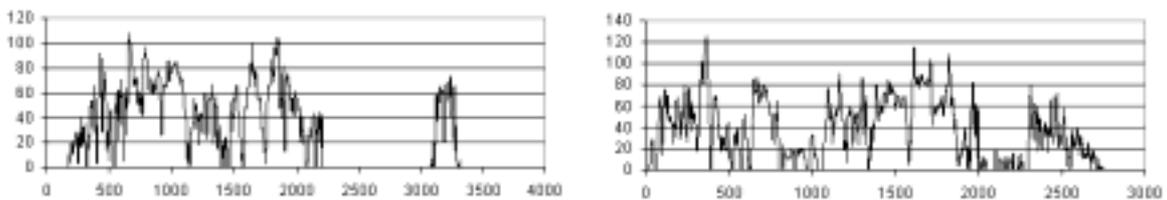


Figure B.13 – Visualisation d’une réalisation de chaque parcours du conducteur N°5.

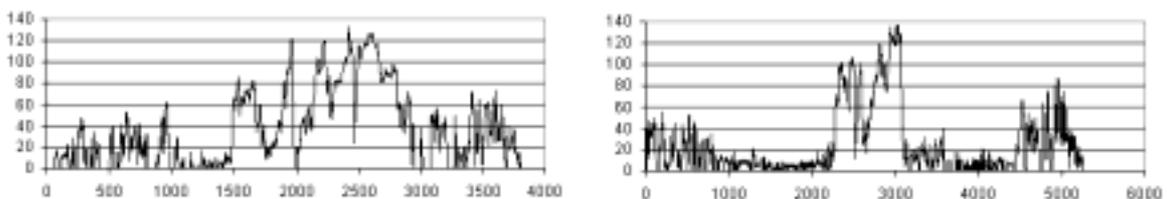


Figure B.14 – Visualisation d’une réalisation de chaque parcours du conducteur N°6.

3 - Les « essais Chambéry ».

Dans la dernière campagne d’essais, nous avons cherché à obtenir des profils de mission réalistes, c’est-à-dire en situation normale d’utilisation. Pour cela, un bus de la ville de Chambéry a été muni d’une centrale d’acquisition pour enregistrer principalement la vitesse du véhicule et la pente de la route. Des mesures récoltées, nous avons identifié deux parcours réalisés chacun une trentaine de fois et correspondant à des successions de lignes de bus régulièrement effectuées.

Les deux tableaux ci-dessous fournissent quelques caractéristiques sur ces parcours et la Figure B.15 et la Figure B.16 visualisent les différents profils de vitesse obtenus.

ANNEXE B - LES CYCLES UTILISES.

	Durée	Puis. aux. moy. kW	Vit. moy. km/h	Répartition de la vitesse								
				0-10 km/h en %	10-20 km/h en %	20-30 km/h en %	30-40 km/h en %	40-50 km/h en %	50-60 km/h en %	60-70 km/h en %	70-80 km/h en %	>90 km/h en %
1	1:40:54	16,19	16,01	35,99	13,58	21,34	15,81	11,89	1,40	0,00	0,00	0,00
2	1:44:45	15,89	15,42	35,71	14,11	23,27	16,12	10,21	0,57	0,00	0,00	0,00
3	1:42:58	16,32	15,69	36,12	14,55	20,65	16,02	10,75	1,91	0,00	0,00	0,00
4	1:43:10	16,60	15,66	41,35	10,79	17,06	14,52	12,99	3,21	0,08	0,00	0,00
5	1:43:15	15,62	15,65	43,08	8,72	16,27	16,51	12,09	3,05	0,29	0,00	0,00
6	1:40:45	15,81	16,04	40,95	10,27	16,90	16,52	11,45	3,59	0,31	0,00	0,00
7	1:42:30	15,96	15,76	38,64	10,26	20,42	18,13	10,81	1,74	0,00	0,00	0,00
8	1:42:00	16,23	15,84	37,12	12,43	20,16	17,45	10,82	2,03	0,00	0,00	0,00
9	1:43:15	16,05	15,65	37,38	11,51	21,50	17,82	10,85	0,95	0,00	0,00	0,00
10	1:42:30	16,10	15,76	34,69	12,21	22,87	21,30	8,81	0,11	0,00	0,00	0,00
11	1:41:19	16,16	15,95	41,13	11,79	17,09	13,01	11,09	5,18	0,71	0,00	0,00
12	1:41:45	16,05	15,88	45,87	8,55	13,54	13,07	12,25	5,49	1,23	0,00	0,00
13	1:42:30	16,70	15,76	38,45	14,00	17,96	14,37	11,07	4,15	0,00	0,00	0,00
14	1:43:15	16,64	15,65	41,09	9,81	17,29	17,38	12,62	1,81	0,00	0,00	0,00
15	1:42:15	15,93	15,80	41,28	11,26	17,26	14,15	10,89	4,89	0,28	0,00	0,00
16	1:42:37	16,57	15,75	42,37	11,37	16,40	13,17	10,26	6,11	0,32	0,00	0,00
17	1:44:15	15,89	15,50	41,03	9,75	17,09	19,21	11,59	1,33	0,00	0,00	0,00
18	1:44:30	16,18	15,46	39,99	11,83	17,81	17,11	10,91	2,33	0,02	0,00	0,00
19	1:43:45	15,87	15,57	37,78	12,69	21,39	15,03	10,87	2,23	0,00	0,00	0,00
20	1:43:25	16,40	15,62	39,25	10,33	18,16	19,71	12,25	0,31	0,00	0,00	0,00
21	1:43:30	15,78	15,61	36,48	12,85	21,94	16,86	10,80	1,06	0,00	0,00	0,00
22	1:41:15	16,31	15,96	38,64	8,92	19,45	21,46	10,60	0,92	0,00	0,00	0,00
23	1:44:30	16,55	15,46	40,90	10,21	16,81	19,12	11,48	1,48	0,00	0,00	0,00
24	1:42:30	15,97	15,76	38,29	9,56	19,75	21,35	10,73	0,33	0,00	0,00	0,00
25	1:45:45	16,92	15,28	40,92	12,34	19,02	13,41	10,02	3,84	0,44	0,00	0,00
26	1:39:44	16,66	16,20	37,59	10,33	19,00	19,80	12,20	1,09	0,00	0,00	0,00
27	1:42:15	16,14	15,80	39,31	11,99	17,80	16,43	12,08	2,28	0,11	0,00	0,00
28	1:44:45	16,21	15,42	38,85	13,97	18,55	14,13	11,93	2,58	0,00	0,00	0,00
29	1:44:30	16,28	15,46	37,67	13,67	20,04	16,35	9,66	2,49	0,13	0,00	0,00
30	1:43:45	16,17	15,57	40,33	10,49	18,41	16,99	11,28	2,51	0,00	0,00	0,00
31	1:43:45	16,02	15,57	38,84	11,79	19,39	16,90	11,44	1,65	0,00	0,00	0,00

Tableau B.2 – Principales caractéristiques du parcours du matin.

ANNEXE B - LES CYCLES UTILISES.

	Durée	Puis. aux. moy. kW	Vit. moy. km/h	Répartition de la vitesse								
				0-10 km/h en %	10-20 km/h en %	20-30 km/h en %	30-40 km/h en %	40-50 km/h en %	50-60 km/h en %	60-70 km/h en %	70-80 km/h en %	>90 km/h en %
1	5:58:45	16,66	18,73	42,63	11,25	14,15	11,90	8,20	4,95	1,14	0,80	4,97
2	5:56:15	17,03	18,86	38,81	12,01	14,95	15,22	9,87	2,78	1,02	1,78	3,56
3	5:59:30	16,78	18,69	38,96	12,54	15,75	14,46	8,46	3,42	1,36	1,13	3,93
4	5:56:00	16,77	18,88	37,57	12,90	16,03	15,61	8,63	3,05	0,95	1,18	4,07
5	5:55:45	17,68	18,89	38,35	13,15	15,92	13,18	9,25	3,60	1,15	1,44	3,98
6	5:56:45	17,08	18,84	38,14	12,12	17,29	13,80	9,30	2,83	0,99	1,65	3,86
7	5:58:40	16,62	18,74	43,62	11,42	11,88	10,72	9,36	5,92	1,66	1,24	4,20
8	5:56:45	17,03	18,84	38,37	12,71	16,15	13,83	9,70	2,91	1,08	1,20	3,98
9	5:57:40	16,74	18,79	38,96	13,75	14,45	13,39	9,80	3,40	0,78	0,96	4,45
10	5:59:15	16,81	18,71	35,21	15,71	16,60	14,49	9,51	2,89	0,71	1,85	2,98
11	5:58:15	16,74	18,76	36,72	13,84	17,08	13,93	8,64	3,60	1,65	1,18	3,34
12	5:58:15	17,03	18,76	34,84	14,12	17,99	15,25	9,70	2,15	1,24	3,02	1,68
13	5:58:15	17,00	18,76	39,23	12,88	15,75	13,27	8,66	3,73	0,90	0,95	4,64
14	5:56:00	17,01	18,88	36,74	14,53	16,54	13,59	8,41	3,67	0,89	2,18	3,45
15	5:56:07	16,57	18,87	39,44	12,75	15,69	12,46	9,16	3,80	0,87	1,18	4,65
16	5:58:15	16,67	18,76	40,41	12,10	15,31	12,78	8,57	3,99	1,35	1,13	4,37
17	5:56:30	16,32	18,85	37,69	12,77	16,36	15,45	8,60	2,86	1,09	1,19	4,01
18	5:58:15	16,96	18,76	41,67	11,15	13,98	12,32	9,75	3,75	1,78	2,63	2,96
19	5:56:30	15,98	18,85	39,00	12,91	15,52	13,59	8,46	3,80	1,57	1,32	3,83
20	5:58:15	16,98	18,76	40,57	12,58	14,69	11,62	9,00	4,96	1,14	1,40	4,04
21	5:56:45	16,89	18,84	37,54	11,48	17,28	15,82	8,65	2,64	1,57	2,22	2,79
22	5:57:05	16,96	18,82	39,02	13,01	15,49	12,58	9,12	4,28	1,20	1,40	3,90
23	5:57:30	16,57	18,80	39,92	12,41	15,13	11,93	9,61	4,38	1,37	1,70	3,56
24	5:56:15	17,11	18,86	39,32	12,66	14,63	12,79	10,53	3,22	1,29	2,26	3,30
25	5:53:30	16,62	19,01	39,38	13,38	14,22	12,56	9,67	4,29	1,04	0,79	4,66
26	6:03:30	16,68	18,49	39,37	13,02	15,78	12,23	9,48	3,87	1,46	1,18	3,61
27	5:54:15	16,70	18,97	39,81	11,61	14,76	13,17	10,57	3,63	1,04	1,42	4,01
28	5:57:15	16,87	18,81	39,43	13,23	14,23	12,71	9,47	4,49	0,97	1,81	3,67

Tableau B.3 – Principales caractéristiques du parcours du soir.

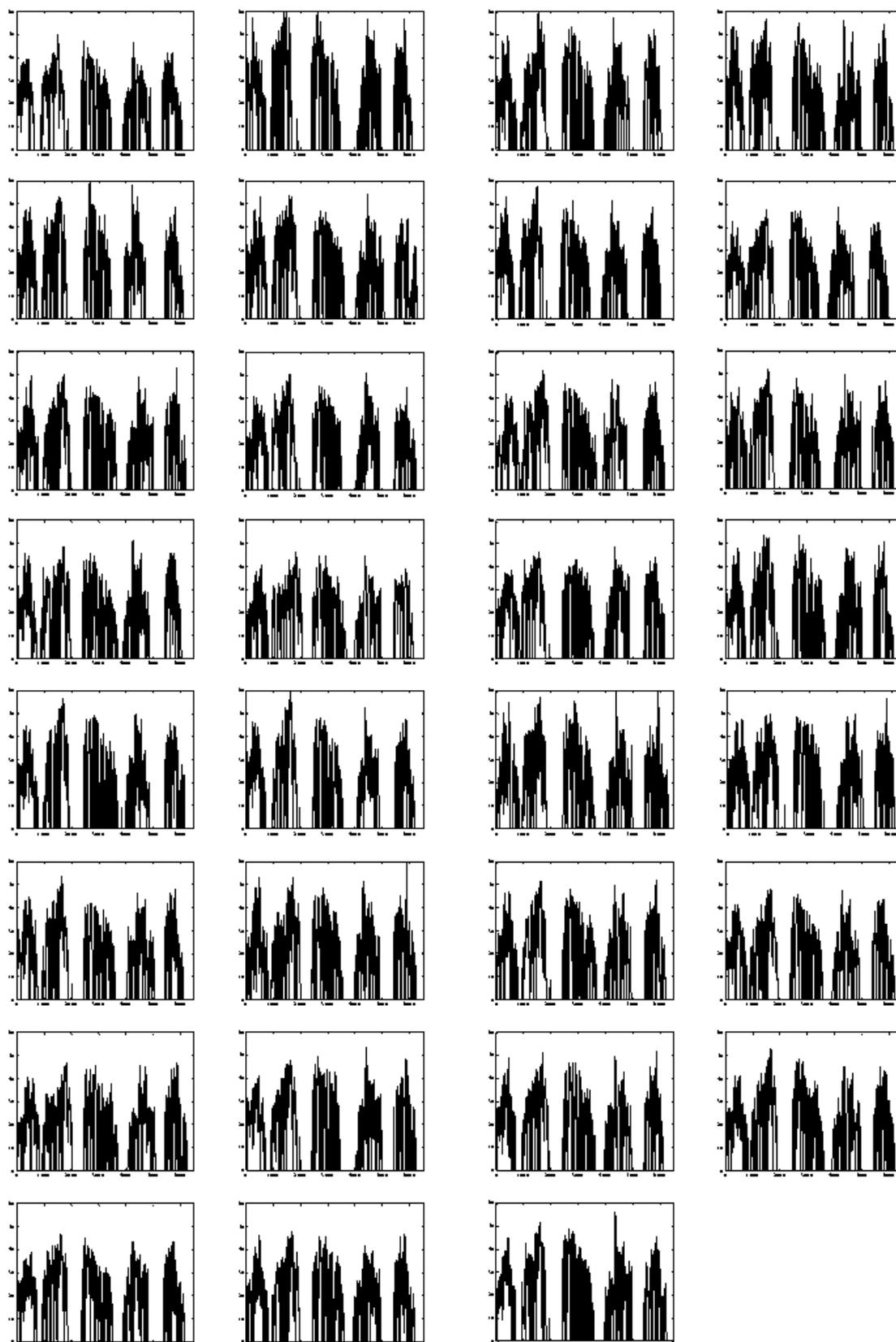


Figure B.15 – Profils de vitesse (km/h) en fonction du temps (s) du parcours du matin.

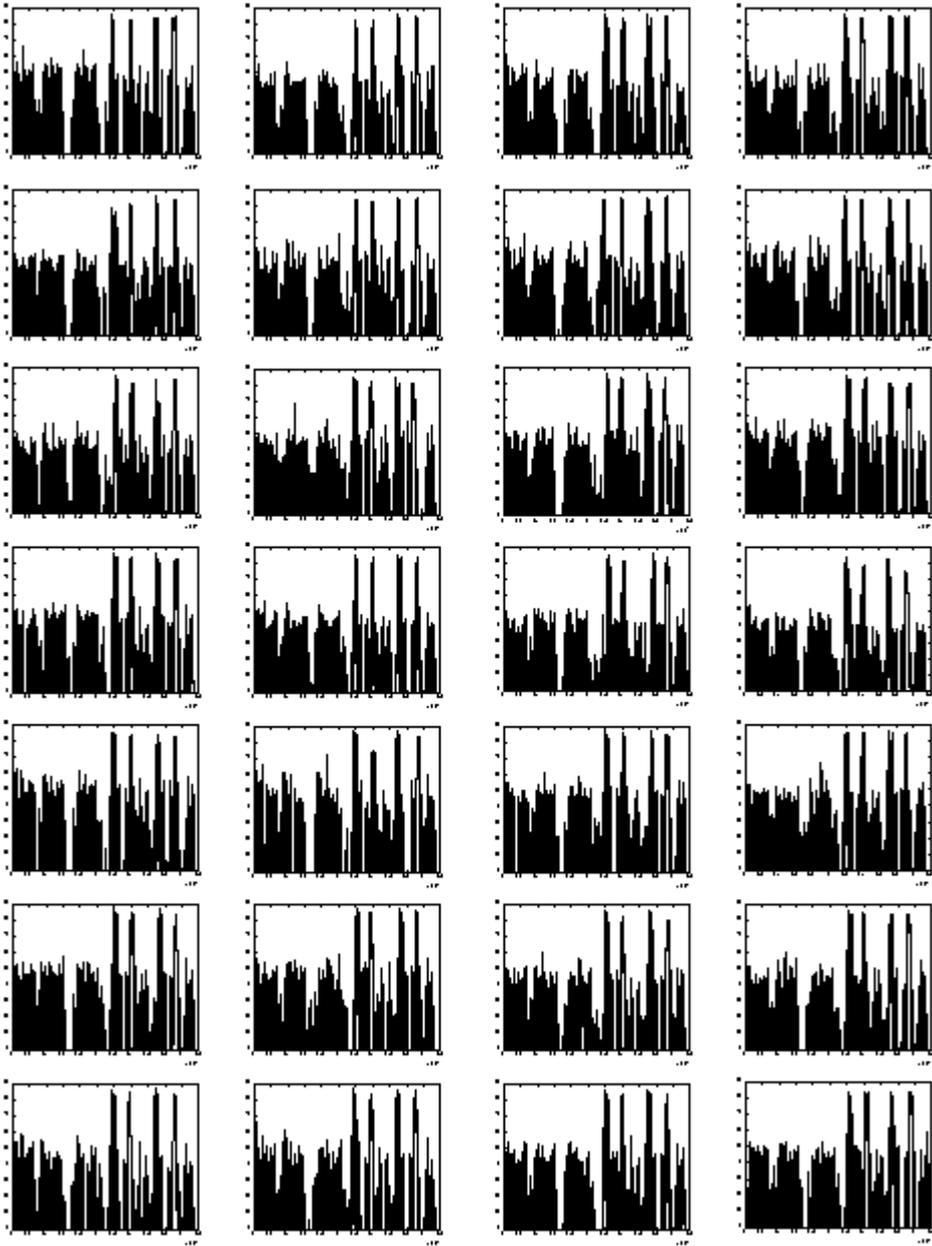


Figure B.16 – Profils de vitesse (km/h) en fonction du temps (s) du parcours du soir.

RESUME en français

Ce mémoire propose une méthodologie de développement de lois de gestion d'énergie prenant en compte le parcours suivi. L'application concerne un bus hybride de type série, disposant d'une autonomie électrique de quelques kilomètres.

La première phase de l'étude a cherché à déterminer la répartition optimale de la puissance demandée par le conducteur entre les deux sources d'énergie, l'organe de stockage temporaire (la batterie) et le générateur électrique (moteur thermique associé à un alternateur). Pour cela, le problème a été formalisé à l'aide de modèles simplifiés des différents composants et résolu par le principe du maximum de Pontryaguine. Les résultats obtenus ont été intégrés dans la commande du véhicule sous forme de cartographies de commande optimale dépendantes d'un unique paramètre K . Ils ont, par ailleurs, nécessité une adaptation pour obtenir des lois de commande implémentables en ligne.

Dans la deuxième étape, ces lois de gestion d'énergie ont été modifiées pour prendre en compte le parcours suivi. Trois niveaux de commande, s'appuyant sur l'état de charge de la batterie, ont alors été définis. Le premier niveau qui est directement tiré des travaux d'optimisation précédents correspond à la commande instantanée. Il est paramétré par K pour permettre à la supervision locale (deuxième niveau) de faire suivre à la batterie un profil d'état de charge désiré. Le dernier niveau réalise, quant à lui, l'apprentissage de ce profil d'état de charge désiré à partir de la reconnaissance a priori du parcours suivi. Une fois le parcours effectué, la réalisation obtenue est évaluée et éventuellement intégrée dans les connaissances acquises suivant son degré de reproductibilité.

Ces lois de gestion d'énergie ont, dans une dernière étape, été validées par simulation Matlab/Simulink. Pour cela, une campagne d'essais a été effectuée sur un véhicule en situation normale de fonctionnement.

TITRE en anglais

Driving Pattern based Energy Management Adaptive Strategy for Hybrid Vehicles.

RESUME en anglais

Thesis objectives are to develop a method to construct adaptive energy management strategy for regular driving patterns. The scope is a hybrid bus in a series configuration, with several kilometres of electric driving range.

The first step of this study tries to specify the optimal distribution of requested power by the driver between the two sources, the energy storage device (the battery) and the electric generator (an internal combustion engine linked to an alternator). With this aim, the optimisation problem was formalised by using simplified models of the various components. Then, it was solved by the Pontryaguine maximum principle. The result was integrated in the vehicle control in an optimal control mappings form, dependent on an unique parameter K . Moreover, an adaptation was proposed to obtain energy management strategies that can be implemented on-line.

In a second step, control was adapted to develop energy management strategy for regular driving patterns. A three level control was defined from the battery state of charge. The first level, that immediately results from the previous work, corresponds to the instantaneous control. Its parameterisation with K allows the local supervision (the second level) to follow a curve of desired state of charge. In the last level, this curve of desired state of charge is learnt from the a priori recognition of the followed driving pattern. After the driving pattern execution, the obtained realisation is evaluated and possibly integrated in the knowledge base according to its reproducibility degree.

Finally, the adaptive energy management strategy was validated by a Matlab/Simulink model applied to a test campaign acquired with a bus in normal operation conditions.

SPECIALITE

Automatique-Productique

MOTS-CLES

Véhicules Hybrides, Lois de Gestion d'Energie, Supervision, Reconnaissance de Parcours.

INTITULE ET ADRESSE DU LABORATOIRE

Laboratoire d'Automatique de Grenoble
ENSIEG-Domaine Universitaire-BP 46
38 402 Saint Martin D'Hères