HAL
open science

Approche systématique de l'optimisation du dimensionnement et de l'élaboration de lois de gestion d'énergie de véhicules hybrides

Julien Scordia

To cite this version:

Julien Scordia. Approche systématique de l'optimisation du dimensionnement et de l'élaboration de lois de gestion d'énergie de véhicules hybrides. Autre. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2004. Français. NNT : 2004NAN10234 . tel-01748092

HAL Id: tel-01748092

https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748092

Submitted on 29 Mar 2018

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.

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11
54601 VILLERS LES NANCY Cédex

Département de formation doctorale en Électrotechnique et Électronique
École doctorale IAEM Lorraine
UFR STMIA

Approche systématique de l'optimisation du dimensionnement et de l'élaboration de lois de gestion d'énergie de véhicules hybrides

THÈSE

Présentée et soutenue publiquement le 10 Novembre 2004

pour l'obtention du

Doctorat de l'université Henri Poincaré – Nancy 1

(spécialité Génie Électrique)

par

Julien SCORDIA

Composition du jury

Président :	François-Michel SARGOS — Professeur à l'ENSEM Nancy
Rapporteurs :	Guy FRIEDRICH — Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne Thierry Marie GUERRA — Professeur à l'Université de Valenciennes
Examinateurs :	François BADIN — Directeur de recherches à l'INRETS Abderrezak REZZOUG — Professeur à l'Université Henri Poincaré de Nancy Rochdi TRIGUI — Chargé de recherches à l'INRETS
Invité :	Cédric PLASSE — Directeur R&D Électronique Valeo Electrical Systems Créteil

Groupe de Recherche en Électrotechnique et Électronique de Nancy — UMR 7037

Mis en page avec la classe thloria.

Remerciements

Ce travail a été mené à l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité, et plus précisément au Laboratoire Transports et Environnement, dont je remercie le Directeur M. Jacques Beaumont, ainsi que certaines personnes du site de Bron avec qui j'ai pu partager d'agréables moments.

Je tiens à remercier vivement Rochdi Trigui, Bruno Jeanneret, et surtout Matthieu Desbois-Renaudin, avec qui l'essentiel du travail a été accompli.

Merci également à la société Valeo et en particulier à Cédric Plasse pour avoir soutenu mon travail et plus généralement le projet.

Mes vifs remerciements sont adressés aux membres du jury pour avoir accepté de juger mon travail, en particulier à mon directeur de thèse Abderrezak Rezzoug.

Je remercie également François Badin pour son suivi attentif, ainsi que le reste de l'équipe véhicules électriques et hybrides : Bertrand Malaquin du côté du banc moteur, Olivier Briat du côté des batteries, Guillaume Alix du côté du moteur thermique, ainsi que Fabien Harel du côté de Belfort. Dans l'équipe énergie et pollution de l'air, je remercie particulièrement Robert Vidon.

"Si les hommes étaient des triangles, Dieu aurait sûrement trois côtés."

(D'Alembert)

Table des matières

Table des figures xvii

Liste des tableaux xxiii

Symboles et notations xxv

Introduction générale xxix

Partie I Véhicules hybrides : définition et problématique

Chapitre 1
Composants utilisés dans les véhicules hybrides

1.1 Stockage d'énergie 3

1.2 Moteur électrique 5

1.3 Moteur thermique 6

1.3.1 Principe 6

1.3.2 Évolutions récentes et futures 7

1.3.2.1 Mélange d'admission 7

1.3.2.2 Distribution 9

1.3.2.3 Mode d'injection 10

1.3.2.4 Rapport volumétrique de compression 10

1.3.2.5 Post-traitement 10

1.4 Transmission 11

1.4.1 Organe démultiplicateur 11

1.4.2 Courroie 11

1.4.3 Embrayage 12

1.5 Réseau électrique de bord 12

1.5.1 Récepteurs électriques 12

1.5.2 Alternateur et réseau électrique de bord 12

1.5.3 Choix de la tension du réseau électrique : 14 ou 42V 14

1.6 Le problème de la climatisation 16

1.6.1 Problématique générale 16

1.6.2 La climatisation pour le véhicule hybride 16

Chapitre 2
Principales architectures de véhicules hybrides

2.1 Tentative de classification des véhicules 19

2.2 Système de représentation 21

2.3 Principales fonctionnalités des véhicules hybrides 22

2.3.1 Optimisation de la gestion d'énergie des accessoires électriques 22

2.3.2 Start/stop 22

2.3.3 Récupération d'énergie au freinage 24

2.3.4 Assistance électrique à la traction ou « boost » 25

2.3.5 Mode tout électrique 25

2.4 Autres fonctionnalités des véhicules hybrides 25

2.5 Architectures et fonctions usuelles 27

2.5.1 Architecture série 27

2.5.1.1 Description 27

2.5.1.2 Avantages et inconvénients 28

2.5.2 Architecture parallèle 28

2.5.2.1 Parallèle un embrayage avec moteur électrique côté moteur thermique 28

2.5.2.2 Parallèle un embrayage avec moteur électrique sur le primaire de la boîte de vitesse 29

2.5.2.3 Parallèle un embrayage avec moteur électrique sur le secondaire de la boîte de vitesse 31

2.5.2.4 Parallèle deux embrayages 32

2.5.3 Architecture parallèle à dérivation de puissance 33

2.5.4 Architecture à motorisation répartie 34

2.5.5 Tableau récapitulatif 34

2.6 Classification quantitative des VHTE suivant le taux d'hybridation 34

2.7 Classification des VHTE indépendante de l'architecture considérée 36

2.8 Quel est le meilleur hybride ? 37

2.9 Essence ou diesel ? 37

2.10 Tendance des constructeurs 37

2.11 Exemples de véhicules hybrides 39

2.11.1 Véhicules commercialisés 39

2.11.2 Prototype de véhicule deux embrayages : Renault Ellypse 39

Chapitre 3
Performances dynamiques et dimensionnement du véhicule hybride

3.1 Respect d'un cahier des charges pour un véhicule conventionnel 43

3.2 Dimensionnement d'un VHTE avec ou sans downsizing 43

3.3 Existence et apparition d'un mode dégradé 44

3.4 Prise en compte du mode dégradé dans le dimensionnement du moteur thermique 46

3.5 Cahier des charges d'un véhicule hybride 47

Chapitre 4
Position du problème

4.1 Commande d'un véhicule hybride 49

4.1.1 Loi de gestion de l'énergie à bord d'un VHTE 49

4.1.2 Charge sustaining ou charge depleting, mesure de la consommation de carburant à bilan batterie nul et loi de gestion d'énergie 50

4.2 Méthodologie proposée, placement par rapport à l'état de l'art 51

4.2.1 Choix de la stratégie de gestion indépendamment des autres paramètres 52

4.2.2 Choix du dimensionnement indépendamment des autres paramètres . 53

4.2.3 Originalité de la démarche proposée : de la comparaison des véhicules jusqu'à la génération de lois en ligne implémentables en temps réel . . 53

4.2.3.1 Optimisation globale hors ligne : détermination systématique du potentiel d'une architecture 53

4.2.3.2 Génération systématique de lois de gestion en ligne 54

Partie II Outil d'optimisation globale KOALA

Chapitre 5
Modélisation du véhicule dans KOALA

5.1 Distinction forward/backward et finesse de modélisation 57

5.2 Détermination du couple à la roue Γ_R à partir de la vitesse à la roue Ω_R . . . 59

5.3 Modélisation des composants du véhicule dans KOALA 59

5.3.1 Batterie 59

5.3.2 Modélisation des moteurs thermique et électrique 60

5.3.2.1 Hypothèses relatives aux deux machines 60

5.3.2.2 Moteur thermique 61

5.3.2.3 Moteur électrique et convertisseur associé 62

5.3.3 Transmission et embrayage 65

5.3.3.1 Boîte de vitesse conventionnelle 66

5.3.3.2 Courroie 66

5.3.3.3 Embrayage 66

5.3.3.4 Différentiel 67

5.3.4 Réseau électrique de bord 67

Chapitre 6
Formulation du problème d'optimisation globale

6.1 Critère de coût 71

6.2 Équation d'état 72

6.3 Conditions limites 72

6.4 Contraintes instantanées de type égalité 72

6.4.1 Conservation de la puissance dans la transmission. 72

6.4.2 Équation électrique du véhicule 75

6.5 Contraintes instantanées de type inégalité 75

6.5.1 Limitation des couples et vitesses des moteurs thermique et électrique dans leurs cartographies respectives 75

6.5.2 Limitation du courant batterie au courant maximum en charge et en décharge 75

6.6 Contraintes d'état 75

6.7 Définition du système et de ses variables de commande, commandes admissibles du problème 76

Chapitre 7
État de l'art concernant la résolution du problème d'optimisation globale ; méthode employée

7.1 Analyse du problème considéré 77

7.2 État de l'art concernant la résolution du problème considéré 77

7.2.1 Calcul variationnel 78

7.2.2 Programmation dynamique 79

7.3 Principe de la programmation dynamique 80

7.3.1 Position du problème 80

7.3.2 Équation de Hamilton-Bellman-Jacobi 80

7.4 Application au problème d'optimisation globale considéré 81

7.4.1 Problème de la complexité 81

7.4.2 Résolution de l'équation HBJ : théorie des graphes et algorithme de Ford 83

7.4.2.1 Bref rappel sur la théorie des graphes 83

7.4.2.2 Algorithme de Ford 83

Chapitre 8
Description de l'outil d'optimisation globale KOALA

8.1 Changement du jeu de commandes du système pour le VHTE parallèle à deux embrayages 85

8.2 Problème de causalité et cartographie du moteur électrique 86

8.3 Application de la méthode des graphes pour la résolution du problème d'optimisation globale 86

8.4 Architectures modélisées par l'algorithme d'optimisation globale KOALA . . 89

Chapitre 9
Résultats d'optimisation globale

9.1 Architecture choisie, hypothèses pour l'établissement des résultats 91

9.2 Validation des résultats : influence de T_{SOC} sur la consommation 91

9.3 Temps de calcul 92

9.4 Vérification du principe d'optimalité de Bellman 93

9.5 État de charge optimal sur le cycle de conduite NEDC 93

9.6 Couples optimaux sur le cycle NEDC 95

9.7 Points de fonctionnement du moteur électrique et du moteur thermique sur cycle NEDC 95

9.7.1 Points de fonctionnement du moteur thermique dans sa cartographie . 95

9.7.2 Points de fonctionnement du moteur électrique dans sa cartographie . 97

9.8 État de charge optimal sur un plus long cycle 97

9.9 Variation du chemin optimum en fonction des caractéristiques batterie 99

9.9.1 Variation de la résistance 99

9.9.2 Variation du rendement faradique 100

9.10 Recherche des m meilleurs chemins dans le plan temps-état de charge 100

Chapitre 10
Étude paramétrique

10.1 Étude paramétrique : utilisation de KOALA 103

10.1.1 Puissance maximale du moteur électrique 105

10.1.1.1 Explication de la figure 10.2 105

10.1.1.2 Analyse de la figure 10.2 106

10.1.2 Rendement maximum du moteur électrique 108

10.1.3 Puissance des accessoires électriques 109

10.2 Comparaison entre architectures 110

10.3 Conclusion : éléments de réponse concernant la valeur relative des différents types de VHTE 111

Partie III Stratégie en ligne

Chapitre 11
Loi de gestion en ligne : problématique et état de l'art

11.1 Comparaison de stratégies 115

11.2 Revue des lois de gestion d'énergie proposées dans la littérature 116

11.2.1 Lois de gestion basées sur des règles empiriques ou issues de l'analyse énergétique du système véhicule hybride 116

11.2.1.1 Lois de gestion empiriques 116

11.2.1.2 Lois de gestion basées sur l'analyse des flux énergétiques dans le système véhicule hybride 116

11.2.2 Méthodes basées directement sur des résultats d'optimisation globale 117

11.2.2.1 Utilisation directe des résultats de l'optimisation 117

11.2.2.2 Utilisation indirecte des résultats de l'optimisation 118

11.2.2.3 Analyse des résultats pour élaboration de lois expertes . . . 118

11.2.2.4 Élaboration d'une loi de gestion en ligne utilisant les conclusions de l'analyse des résultats d'optimisation sur des cycles de type créneaux 121

11.3 Problématique du contrôle de l'état de charge batterie 121

11.3.1 Gestion du mode dégradé 121

11.3.2 Mode de fonctionnement normal 121

11.3.2.1 Notion de contrôle de l'état de charge sur un cycle 121

11.3.2.2 Conditions suffisantes au contrôle asymptotique de l'état de charge sur un cycle 122

11.3.2.3 Technique d'élaboration des stratégies 129

11.4 Analyse des résultats instantanés de KOALA concernant les condition 0 et 0' 129

Chapitre 12
Stratégie en ligne établie systématiquement à partir des résultats de l'optimisation globale

12.1 Cadre de la démarche proposée 131

12.2 Approche par réseaux de neurones 131

12.2.1 Présentation des réseaux de neurones artificiels 131

12.2.2 Modèle mathématique de McCulloch et Pitts 132

12.2.3 Réglage des coefficients synaptiques : loi de Hebb 132

12.2.4 Définition des entrées et sorties du réseau 133

12.2.5 Précisions concernant l'entrée état de charge 133

12.2.5.1 Signification de l'entrée état de charge lors de l'apprentissage puis l'utilisation 133

12.2.5.2 Choix du cycle et rapport à la distance 135

12.2.6 Réseau de neurones et conditions d'application des propriétés 1 à 4 du chapitre 11 135

12.2.7 Réseau RBF-DDA 136

12.2.7.1 Introduction 136

12.2.7.2 Description générale 136

12.2.7.3 Classification bayesienne 136

12.2.7.4 Réalisation pratique 137

12.2.7.5 Performances, capacité de généralisation 139

12.2.7.6 Normalisation des entrées 141

12.2.7.7 Méthodes d'élagage 141

12.3 Utilisation du réseau RBF-DDA dans le problème de la commande en ligne de VHTE 142

12.4 Application backward en ligne dans KOALA 142

12.4.1 Reproduction de la courbe d'état de charge optimal sur un cycle NEDC 142

12.4.2 Apprentissage sur HYZEM urbain, routier, autoroutier. Utilisation sur les mêmes cycles 143

12.4.3 Apprentissage sur HYZEM urbain, routier, autoroutier. Utilisation sur cycles ARTEMIS et NEDC 144

12.4.4 Comparaison pour diverses puissances de moteur électrique 148

12.5 Application forward en ligne dans VEHLIB 148

12.5.1 Différences de modélisation avec l'application backward en ligne dans KOALA 148

12.5.2 Introduction de lois de confort 152

12.5.2.1 Choix des rapports de boîte avec hystérésis 152

12.5.2.2 Temps de marche minimum du moteur thermique 152

12.6 Le réseau de neurones en tant que conseiller concernant le flux série et le boost, dans le but de contrôler l'état de charge de la batterie 153

12.7 Influence du jeu de cycles servant à l'apprentissage 153

12.8 Nombre de neurones et application sur banc dynamique 154

Chapitre 13
Confrontation à l'expérience

13.1 Installations disponibles à l'INRETS Bron 157

13.1.1 Banc à rouleau 157

13.1.2 Banc moteur dynamique 158

13.1.3 Système d'analyse des polluants 159

13.2 Résultats expérimentaux 159

13.2.1 Utilisation des réseaux de neurones dans l'applicatif temps réel VEHIL 159

13.2.2 Optimisation des rapports de boîte sur un véhicule thermique classique 161

13.2.2.1 Procédure de lissage des rapports 162

13.2.2.2 Impact sur la consommation de carburant 164

13.2.3 Conclusion 165

Conclusion générale **167**

Annexe

Annexe A
Démarche globale employée dans le cadre de la thèse et de l'étude PARAVH

Annexe B
Glossaire

Annexe C
Rappel du principe de la climatisation

Annexe D
Caractéristiques de quelques véhicules hybrides

Annexe E
Mesure de la consommation d'un véhicule par suivi de vitesse

Annexe F
Rappel d'automatique

Annexe G
Calcul des variations et application au travers de la commande optimale des systèmes

G.1 Calcul de trajectoire optimale via le calcul des variations 185

G.2 Commande optimale d'un système via le calcul des variations 186

Annexe H
Réducteur et inertie du secondaire vue au primaire

Annexe I
Démarrage du moteur thermique

Annexe J
Influence de l'inertie des parties tournantes dans KOALA

Annexe K
Émissions de polluants réglementés lors de l'essai à rapports optimisés lissés de la 306 HDI au banc à rouleau

Annexe L
Types de graphe et problèmes les plus fréquents

Annexe M
Égalisateur de charge pour batteries

Annexe N
Analyse des résultats instantanés de KOALA

Annexe O
Classification bayesienne

Annexe P
Publications

Bibliographie 227

Table des figures

D Annexe 197

1 Évolution des normes d'émission européennes à l'homologation, en grammes par kilomètre . . . xxxi

2 Émissions de CO_2 du cycle normalisé européen en fonction de la puissance pour divers véhicules vendus en France . . . xxxii

1.1 Batterie Saft Lithium-ion (source : [RCN+03]) . . . 4

1.2 Capacité fournie par une batterie plomb, en fonction du courant de décharge et de la température (source : guide Bosch [Bos00]) . . . 5

1.3 Description des quatre phases du cycle à quatre temps (allumage commandé) (Source : guide Bosch [Bos00]) . . . 7

1.4 Schéma de principe du turbocompresseur (source : Techniques de l'Ingénieur) . . . 8

1.5 Synoptique du circuit d'air du moteur équipant le Peugeot 806 HDI 110 ch (source : revue technique automobile). . . . 9

1.6 Circuit du réseau de bord : alternateur et sa commande, batterie, accessoires . . . 13

2.1 Classification des véhicules . . . 21

2.2 Mode de représentation de divers composants du véhicule hybride . . . 22

2.3 Modes de fonctionnement d'un véhicule hybride dans le plan puissance du moteur électrique fonction de la puissance du moteur thermique . . . 23

2.4 Architecture hybride série . . . 27

2.5 Architecture parallèle un embrayage avec moteur électrique côté moteur thermique 29

2.6 Architecture des Honda Insight et Civic IMA . . . 30

2.7 Architecture parallèle un embrayage avec moteur électrique côté boîte de vitesse . 30

2.8 Architecture parallèle un embrayage avec moteur électrique sur le secondaire de la boîte de vitesse . . . 32

2.9 Architecture parallèle deux embrayages . . . 32

2.10 Architecture d'un hybride parallèle à dérivation de puissance : la Toyota Prius . . 33

2.11 Architecture à motorisation répartie . . . 34

2.12 Toyota Prius : vue générale, bloc moteur, détail système THS . . . 40

2.13 Honda Civic : vue générale et bloc moteur 40

2.14 Renault Ellypse : vue générale et bloc moteur 41

3.1 Zone d'utilisation de l'ensemble moteur thermique/moteur électrique permettant d'éviter l'existence du mode dégradé 45

3.2 Allure des courbes de puissance moteur électrique et thermique dans le cas de la non-existence du mode dégradé 46

4.1 Détermination de la consommation sur un cycle 51

5.1 Système véhicule conventionnel en modélisation forward 58

5.2 Caractéristiques suivant l'état de charge de la batterie Exide Orbital 12V-40 Ah Deep Cycle 61

5.3 Cartographie du moteur thermique de la Peugeot 306 2.0L HDI 62

5.4 Courbes de Willans pour le moteur K9K 63

5.5 Exemple de la cartographie de rendement d'un moteur électrique Unique Mobility 30 kW et de son onduleur 64

5.6 Architecture électrique type du véhicule hybride dans un cadre bi-tension 12/42V 68

5.7 Caractéristique batterie 69

6.1 Expression du problème de commande du VHTE à deux embrayages 76

7.1 Concept de graphe orienté 83

8.1 Cycle de conduite et limites d'état de charge relatif SOC_r correspondantes (schéma de principe) 88

8.2 Éventail de possibilités de courant batterie I_B à chaque instant (schéma de principe) 88

8.3 Synoptique du VHTE idéal 89

8.4 Synoptique du véhicule thermique conventionnel idéal 90

9.1 Convergence des résultats de consommation avec la valeur de $\epsilon(T_{SOC})$ 92

9.2 Chemins optimaux correspondant à des différences d'état de charge sur le cycle échelonnées entre -40 et +40% 93

9.3 Agrandissement sur les chemins optimaux correspondant à des différences d'état de charge sur le cycle échelonnées entre -40 et +40% 94

9.4 Chemin d'état de charge relatif optimum sur un cycle NEDC : vue globale et agrandissement 94

9.5 Allure des couples des moteurs thermiques et électriques sur la partie ECE15 du cycle NEDC 96

9.6 Points de fonctionnement optimum du moteur thermique sur le cycle NEDC, choisis par KOALA 96

9.7 Régime du moteur thermique choisi par KOALA, en fonction du régime à la roue, sur le cycle NEDC 97

9.8 Points de fonctionnement optimum du moteur électrique sur le cycle NEDC, choisis par KOALA 98

9.9 Chemin d'état de charge relatif optimum sur un cycle NEDC allongé 98

9.10 Variation du chemin optimal d'état de charge et de la consommation en fonction de la résistance batterie (cycle HYZEM Urbain) 99

9.11 Variation du chemin optimal d'état de charge et de la consommation en fonction du rendement faradique de la batterie (cycle HYZEM Urbain) 100

9.12 Puissances sur les moteurs thermique et électrique en fonction de la vitesse à la roue pour le cycle HYZEM Urbain (rendement faradique égal à 0.2) 101

9.13 Puissances sur les moteurs thermique et électrique en fonction de la vitesse à la roue pour le cycle HYZEM Urbain (rendement faradique égal à 1) 101

9.14 Cent meilleurs chemins dans le graphe temps/état de charge, pour le cycle de vitesse NEDC 102

10.1 Procédure de dimensionnement du véhicule hybride 104

10.2 Variation de la consommation en fonction de la puissance maximum du moteur électrique 106

10.3 Variation de la consommation en fonction du rendement maximum du moteur électrique 108

10.4 Variation de la consommation en fonction de la puissance des accessoires 109

10.5 Variation de la consommation en fonction de la puissance maximum du moteur électrique, pour diverses architectures 110

11.1 Créneau de vitesse élémentaire 120

11.2 Points de fonctionnement du véhicule dans le plan puissance moteur électrique fonction de la puissance à la roue 120

11.3 Notations employées dans la preuve de la propriété 2 125

12.1 Modèle de neurone selon Mc Culloch et Pitts 132

12.2 Entrées et sorties du réseau 134

12.3 Construction du réseau RBF-DDA sur un cas simple 138

12.4 Réseau sommaire obtenu 139

12.5 Test des spirales entrelacées 140

12.6 Modification des fonctions d'appartenance de manière à pouvoir généraliser à l'infini 141

12.7 Apprentissage sur NEDC à un seul état de charge, réponse du réseau correspondante 144

12.8 Apprentissage sur cycles HYZEM. Utilisation sur HYZEM urbain 145

12.9 Apprentissage sur cycles HYZEM. Utilisation sur la concaténation de vingt cycles HYZEM urbain 145

12.10 Apprentissage sur cycles HYZEM. Utilisation sur HYZEM routier 146

12.11 Apprentissage sur cycles HYZEM. Utilisation sur ARTEMIS urbain 147

12.12 Apprentissage sur cycles HYZEM. Utilisation sur ARTEMIS routier 147

12.13 Apprentissage sur cycles HYZEM. Utilisation sur NEDC 148

12.14 Variation de la consommation en fonction de la puissance du moteur électrique sur cycle HYZEM urbain 149

12.15 Variation de la consommation en fonction de la puissance du moteur électrique sur cycle HYZEM routier 149

12.16 Variation de la consommation en fonction de la puissance du moteur électrique sur cycle NEDC 150

12.17 Vue générale du véhicule hybride parallèle deux embrayages dans VEHLIB 150

12.18 Répartition des causes de la décharge de la batterie dans le modèle de VEHLIB commandé avec les sorties de KOALA 151

12.19 Répartition des causes de la hausse de consommation dans le modèle de VEHLIB commandé avec les sorties de KOALA 151

12.20 Allure des rapports optimisés par KOALA sur l'ensemble des cycles HYZEM . . 152

13.1 Véhicule Volkswagen/Valeo « Stop and Go » fixé sur le banc à rouleau du LTE pour mesures de consommations 157

13.2 Banc moteur dynamique du LTE. Configuration véhicule conventionnel 306 HDI (moteur DW10TD). 158

13.3 Banc moteur dynamique du LTE. Configuration véhicule hybride deux embrayages avec moteur thermique Renault 1.5 l dCi, moteur électrique Valeo Mars, et embrayage commandé Valeo 159

13.4 Synoptique du banc moteur dynamique du LTE 160

13.5 Système d'analyse des polluants du LTE 160

13.6 Vitesses véhicule demandées et réalisées ; consigne d'injection et courant batterie correspondants (cycle NEDC) 162

13.7 Rapports de boîte non lissés et vitesse à la roue pour un véhicule thermique classique (cycle HYZEM urbain) 163

13.8 Rapports de boîte lissés et vitesse à la roue pour un véhicule thermique classique (cycle HYZEM urbain) 164

13.9 Vitesse véhicule demandée et réalisée pour un échelon de vitesse, dans trois configurations différentes 165

A.1 Schéma de principe simplifié de la démarche globale employée au LTE 170

B.1 Synoptique du véhicule hybride 171

C.1 Schéma de principe et diagramme thermodynamique du circuit de fluide de réfrigération dans une climatisation automobile 176

E.1 Cycle MVEG (ou NEDC) 180

F.1 Système automatique 182

K.1 Émissions de polluants sur le banc à rouleau 193

M.1 Circuit égaliseur de charge pour trois batteries identiques 198

Liste des tableaux

1.1 Exemples de caractéristiques actuelles des stockeurs électrochimiques plomb et NiMH 5

1.2 Caractéristiques générales des moteurs électriques synchrones et asynchrones . . . 6

2.1 Résumé des avantages et inconvénients des diverses architectures présentées . . . 35

6.1 Résumé des possibilités de la chaîne de traction en correspondance avec l'état des embrayages. 74

9.1 Temps de calcul et nombre de sommets selon la valeur de $\epsilon(T_{SOC})$ 92

10.1 Comparaison des configurations hybrides d'après Volkswagen 112

12.1 Résumé des gains ou pertes de consommation obtenus avec la commande par réseau de neurones, dans KOALA et VEHLIB, pour le véhicule hybride deux embrayages équipé du moteur thermique de la Clio 1.5l dCi, et du moteur électrique Valeo Mars 155

13.1 Nombre de changements de rapports sur les cycles HYZEM 163

13.2 Consommations (l/100 km) données par KOALA et mesurées sur le banc à rouleau 164

D.2 Caractéristiques de véhicules hybrides commercialisés en 2004 178

Symboles et notations

Symboles

La plupart des grandeurs sont exprimées en unités S.I.. Certaines notations seront complétées par un indice ou exposant (voir plus bas). Ceci est signalé via un point, en indice ou en exposant suivant le cas.

Par exemple, $\Gamma_{ME_{max}}(\Omega_{ME})$ représentera le couple maximum en $\mathrm{N \cdot m}$ du moteur électrique, fonction de son régime de rotation .

Symbole	Signification	Unité
$\Gamma_{.}$	Couple	$\mathrm{N \cdot m}$
$\Omega_{.}$	Vitesse de rotation	$\mathrm{rad \cdot s^{-1}}$
$\eta_{\Gamma_{.}}$	Rendement en couple	—
$\eta_{\Omega_{.}}$	Rendement en vitesse	—
$\eta_{P_{.}}$	Rendement en puissance	—
$P_{.}$	Puissance	W
r_{BV}	Rapport de boîte de vitesses (dans le cas d'une boîte à cinq rapports, k=0 (point mort), 1, 2, 3, 4 ou 5.	—
r_{EMB_i}	Course de l'embrayage numéro i.	—
$k_{.}$	Rapport de réduction. Dans le cas d'un embrayage, ce rapport est compris entre 0 et 1 : 1 correspond à la transmission intégrale du couple lorsque l'embrayage est fermé, 0 correspond à l'embrayage ouvert.	—
SOC_r	État de charge instantané relatif de la batterie (« State Of Charge »). Il s'agit d'un état de charge relatif, par rapport à une valeur quelconque d'état de charge, idéalement celle préconisée par le constructeur.	$\mathrm{A \cdot s}$
SOC_p	État de charge préférentiel de la batterie.	$\mathrm{A \cdot s}$
SOC	État de charge instantané absolu de la batterie (« State Of Charge »). Il s'agit du nombre de coulombs réellement disponibles dans la batterie.	$\mathrm{A \cdot s}$
ΔSOC_r	Différence d'état de charge relatif de la batterie entre le début et la fin du cycle.	$\mathrm{A \cdot s}$
T_{SOC}	Pas de discrétisation en état de charge batterie	$\mathrm{A \cdot s}$
I_B	Courant batterie	A
E_B	Force électromotrice de la batterie (tension à vide).	V
R_B	Résistance interne de la batterie	Ω
C_B	Capacité batterie	$A \cdot s$

Symbole	Signification	Unité
ν_B	Caractéristique particulière de la batterie, assimilable à un rendement faradique	—
$Pe(\Omega_{ME}, \Gamma_{ME})$	Pertes du moteur électrique et du convertisseur d'électronique de puissance associé en fonction du régime et du couple sur le moteur électrique	W
$Pe(\Omega_{ME}, I_B)$	Pertes du moteur électrique et du convertisseur d'électronique de puissance associé en fonction du régime moteur électrique et du courant batterie	W
P_{ACC}	Puissance batterie utilisée par les accessoires	W
I_{ACC}	Courant batterie utilisé par les accessoires	A
I_{ME}	Courant batterie utilisé par le moteur électrique	A
T_e	Temps d'échantillonnage	s
$n \cdot T_e$	Durée du cycle	s
$C_{MT}(\Omega_{MT}, \Gamma_{MT})$	Consommation du moteur thermique en fonction de son régime de rotation et de son couple	$g \cdot s^{-1}$
$CSP(\Omega_{MT}, \Gamma_{MT})$	Consommation spécifique du moteur thermique en fonction de son régime de rotation et de son couple	$g \cdot kWh^{-1}$
$\Omega_{MT_{ral}}$	Vitesse de ralenti du moteur thermique	$rad \cdot s^{-1}$
$elhyb$	Drapeau indiquant le mode de fonctionnement du véhicule : $elhyb = 0$ correspond au mode tout électrique, tandis que $elhyb = 1$ correspond au mode hybride (i.e. les deux machines participent à la traction du véhicule)	—
Ω_{R_s}	Vitesse de la roue à partir de laquelle on considère que le véhicule est arrêté.	$rad \cdot s^{-1}$
Γ_{R_s}	Couple de la roue à partir duquel on considère que la demande de puissance est nulle (en fait, si conjointement on a $\Omega_R < \Omega_{R_s}$	$N \cdot m$
$\Omega_{R_{MT}}$	Valeur de la vitesse à la roue ramenée au vilebrequin en tenant compte des rapports de transmission et des rendements en vitesse. Ceci est utilisé pour simplifier les notations.	$rad \cdot s^{-1}$
ρ	Masse volumique	$kg \cdot m^{-3}$
R	Constante universelle des gaz parfaits	$J \cdot kmol^{-1} \cdot K^{-1}$
T	Température	K
P	Pression	Pa

Notations

Notation	Signification
$\cdot ME$	Moteur électrique
$\cdot MT$	Moteur thermique
$\cdot FR$	Freins mécaniques
$\cdot R$	Roues
$\cdot ACC$	Accessoires
$\cdot BV$	Boîte de vitesses

Notation	Signification
$\cdot CO$	Courroie
$\cdot EMB_i$	Embrayage numéro i
$\cdot DIFF$	Différentiel
dim	Dimensionnement du véhicule considéré, c'est-à-dire les trois éléments suivants : caisse en blanc, chaîne de traction et source d'énergie principale
cyc	Cycle de conduite vitesse/temps considéré
arc	Architectures du véhicule hybride considéré.
$\cdot min$	Valeur minimale
$\cdot max$	Valeur maximale
$\cdot i$	Indice temporel
$\cdot s$	Indique la valeur de seuil d'une grandeur.
$\cdot c$	Indique une grandeur de consigne.
$\cdot pri$	Grandeur au primaire d'un embrayage.
$\cdot sec$	Grandeur au secondaire d'un embrayage.
$\cdot cons$	Grandeur de consigne

Introduction générale

Depuis une centaine d'années, la consommation des carburants issus du pétrole a continuellement augmenté du fait notamment de l'essor des transports routiers. Cette énergie dispose en effet de plusieurs avantages, entre autres sa haute densité (10 kWh/litre) et sa présence en grande quantité sur la planète. Cependant, elle est associée à l'émission de divers polluants, qu'on peut classer en deux types [BJHT00, Jou02, Enc04, Raj02, Min04] :

- ▷ les émissions *locales* ou *régionales*. Leurs effets sont ressentis directement par les habitants des agglomérations, et dépendent des conditions géographiques du site (vallée, altitude, etc.) mais également des conditions atmosphériques (ensoleillement, vent, etc.). Les polluants concernés sont :
  - ◇ le monoxyde de carbone (CO) et les hydrocarbures imbrûlés (HC), qu'on regroupe parfois sous le terme générique de « composés organiques volatils » (COV). En dehors de l'aspect hautement toxique du monoxyde de carbone, les COV provoquent un vieillissement accéléré des tissus biologiques via un processus d'oxydation [CS99] ;
  - ◇ les oxydes d'azote (NO_x), qui jouent un rôle dans la formation de l'ozone (O_3) évoqué ci-après. Par exemple, le dioxyde d'azote (NO_2) est un gaz brun rougeâtre à l'odeur âcre ; puissant agent oxydant, il donne, par réaction avec l'air, de l'acide nitrique qui contribue au phénomène de pluie acide ;
  - ◇ le dioxyde de soufre (SO_2). Celui-ci est un produit de la combustion du pétrole et du charbon. Sa présence se manifeste chez l'être humain par des irritations [BBJ+96], et participe également au phénomène de pluie acide via la production d'acide sulfurique. Des mesures sont prises depuis une dizaine d'années pour filtrer les gaz s'échappant des usines, et les carburants sont grandement désoufrés lors du raffinage. Ainsi les concentrations de dioxyde de soufre ont fortement diminué : 50% depuis 15 ans [Acaa] ;
  - ◇ Les particules qui peuvent être à l'origine d'irritations oculaires parfois ressenties en ville dans les embouteillages. L'effet sur la santé des particules fines (diamètre équivalent inférieur à quelques microns) reste encore une inconnue [Jou02].
- ▷ les émissions *transfrontalières* ou *globales*. Leurs effets peuvent couvrir plusieurs pays, voire la planète entière. Les polluants concernés sont principalement :
  - ◇ le dioxyde de carbone, ou CO_2. Il s'agit du premier contributeur à l'effet de serre, c'est-à-dire à la modification de l'équilibre radiatif entre l'atmosphère et le sol. Son émission est directement liée à la consommation de carburant des véhicules. Cet effet est ressenti à l'échelle de la planète entière.
  - ◇ les COV se combinent avec les oxydes d'azote (NO_x) sous l'effet des ultraviolets pour donner de l'ozone. Cet ozone troposphérique est le principal constituant du smog photochimique (avec les particules et le NO_2 [Acab]), se présentant sous la forme de nuages pouvant s'étendre sur des centaines de kilomètres [Jou02]. Celui-ci a le même effet que les COV, c'est-à-dire qu'il possède un fort pouvoir d'oxydation. Par exemple, il cause des

dommages perceptibles à la forêt et détériore les métaux ainsi que les surfaces peintes. Sur les animaux, il cause des irritations aux poumons et rend la respiration difficile.

Selon [Jou02], les émissions des polluants atmosphériques, hors CO_2, peuvent être réduites de manière efficace par les nouveaux systèmes de post-traitement des véhicules, même si l'amélioration ne sera perceptible que lorsque l'intégralité du parc automobile aura été renouvelée. Il faut cependant surveiller les émissions de NO_x ainsi que de particules fines, qui sont émises principalement par les véhicules à motorisation diesel, qui équipent une part croissante des parcs dans les pays européens. Des moyens technologiques pour leur réduction existent et commencent à être mis en oeuvre sur des véhicules haut de gamme (piège à NO_x, filtre à particules). Ainsi, la limitation des émissions des polluants hors CO_2 via les normes Euro (figure 1) semble ne pas poser de problème insurmontable aux constructeurs. [Jou02] met en garde contre des attitudes trop alarmistes, comme fut celle de la communauté scientifique dans les années 80, vis-à-vis des pluies acides.

Cependant, avec une part estimée aujourd'hui à 27% des émissions globales de CO_2, le secteur des transports est le premier contributeur au réchauffement de la planète. De plus, la forte croissance dans les pays émergents tels la Chine ou l'Inde entraîne une constante augmentation de la part des transports dans le réchauffement global [Mis].

Dans ce schéma, l'Association des Constructeurs Européens d'Automobile (ACEA) s'est engagée à réduire le niveau d'émission moyen de CO_2 de l'ensemble de la gamme de véhicules neufs. Pour la CEE, il s'agit de faire passer ces niveaux d'émission de 186 g/km en 1995 à un objectif de 140 g/km en 2008, puis 120 g/km en 2012. Les émissions en CO_2 d'un véhicule étant quasiment proportionnelles à sa consommation, cet engagement devrait avoir pour conséquence une consommation d'environ 6 litres d'essence (ou 5,3 litres de gazole) aux 100 kilomètres en l'an 2008, pour la moyenne de la gamme d'un constructeur. Cependant, ces chiffres correspondent à un engagement des constructeurs, aucune norme n'est encore en vigueur.

Il reste à vérifier qu'au niveau global, l'augmentation de la mobilité dans les pays émergents ou en développement ne contre-balancera pas l'effet positif de la baisse de consommation unitaire des véhicules. Ainsi, de 100 millions de véhicules en circulation sur la planète en 1960, les prévisions font état de 950 millions en 2010. Alors que le nombre de véhicules restera constant dans les pays occidentaux, il ne cessera de croître en Asie, Amérique du Sud, et Afrique [MLK01]. Un autre danger pourrait très bien annihiler les efforts des constructeurs en faveur de la baisse de consommation, il s'agit de la généralisation de la climatisation à bord des véhicules particuliers [Jou02, BCR98].

Il s'agit donc pour les constructeurs de limiter les émissions et la consommation de leurs véhicules tout en maintenant leur niveau de performance à un niveau acceptable avec la demande de leur clientèle.

C'est pourquoi un certain nombre de solutions alternatives sont utilisées ou à l'étude :

- ▷ *l'amélioration des solutions existantes*, qui seront abordées dans la première partie de ce mémoire ;
- ▷ *les carburants alternatifs*, parmi lesquels on compte principalement le gaz de pétrole liquéfié (GPL), le gaz naturel, et l'éthanol. Leur utilisation ne concerne que 2% du total de l'énergie des transports ; les émissions de gaz à effet de serre[1] correspondantes ne sont pas forcément plus

[1] Parmi ceux-ci, on compte le CO_2, mais aussi des gaz ayant un effet encore plus prononcé sur l'effet de serre, tels que le méthane CH_4.

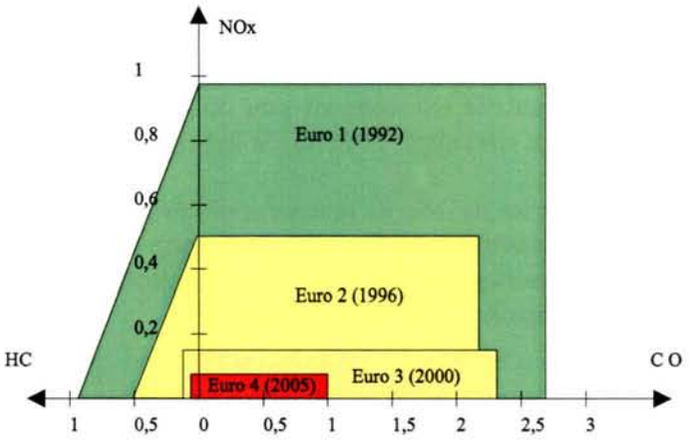


FIG. 1: *Évolution des normes d'émission européennes à l'homologation, en grammes par kilomètre*

avantageuses que celles des carburants conventionnels. Présenté comme le carburant de l'avenir, l'hydrogène comprimé ou cryogénique utilisé dans une pile à combustible ou un moteur alternatif conventionnel (moyennant certaines modifications) a pour avantage de minimiser les émissions de polluants, mais en ce qui concerne le CO_2, l'apport ne semble pas décisif. Dans ce contexte, certains auteurs font part de leur doute quant à l'émergence de cette filière avant la deuxième moitié du XXIe siècle [Dou01], surtout lorsqu'on considère les nouvelles infrastructures de fourniture de carburant à mettre en place[MLK01] ;

▷ *les véhicules à motorisation hybride,* qui font l'objet de ce travail de thèse. En évitant une rupture au niveau de la technologie véhicule et des infrastructures énergétiques, ils constituent à court et moyen terme l'alternative la plus prometteuse pour atteindre l' objectif de consommation de 120 g/km en 2012 [MLK01]. Cependant, il est possible que l'amélioration des solutions existantes soit suffisante : ainsi, la politique des constructeurs français en 2004 est de se concentrer sur celle-ci plutôt que de procéder directement à l'hybridation de leur gamme.

Historiquement, les constructeurs réagirent aux inquiétudes du public concernant la pollution urbaine en commercialisant des véhicules électriques dès les années 90, qui du même coup pouvaient constituer une solution face au problème de l'effet de serre[2]. Mais le handicap constitué par une batterie lourde, coûteuse, et de capacité insuffisante n'a pu encore être surmonté ; et il semble que ceci soit une condition nécessaire à l'émergence d'un véritable marché du véhicule électrique à diffusion massive.

Dans ce contexte, la réalisation de véhicules dits « hybrides » semble être une des réponses au problème de l'effet de serre, comme cela peut être observé sur la figure 2. Au scepticisme a succédé l'enthousiasme avec le nouveau modèle du véhicule Prius de Toyota : le constructeur nippon a atteint un excellent compromis entre prix, performances, et agrément de conduite [DRB04].

Mais l'expérience montre que seule une politique environnementale coercitive associée éventuellement à une pression des consommateurs peut inciter les constructeurs à proposer des solutions innovantes, en particulier plus écologiques. En effet, un certain nombre de paramètres constituent

[2]Dans le cas où le mix de production électrique du pays envisagé est principalement nucléaire, comme c'est le cas en France. Le problème des déchets radioactifs n'est cependant pas des moindres.

un frein à l'innovation, surtout en ce qui concerne le véhicule hybride :

- ▷ il est financièrement risqué d'apporter un grand nombre d'innovations sur un véhicule, surtout chez les constructeurs disposant de relativement peu de modèles dans leur gamme[3]. C'est pourquoi beaucoup d'entre eux envisagent l'éventuelle hybridation de leur gamme de manière progressive ;
- ▷ il est nécessaire de réorganiser les services de recherche et développement de manière à ce que l'aspect pluridisciplinaire du véhicule hybride puisse être traité dans les meilleures conditions ;
- ▷ il existe une certaine inertie dans les services recherche et développement, quant à l'acceptation d'un moteur électrique participant à la traction du véhicule.

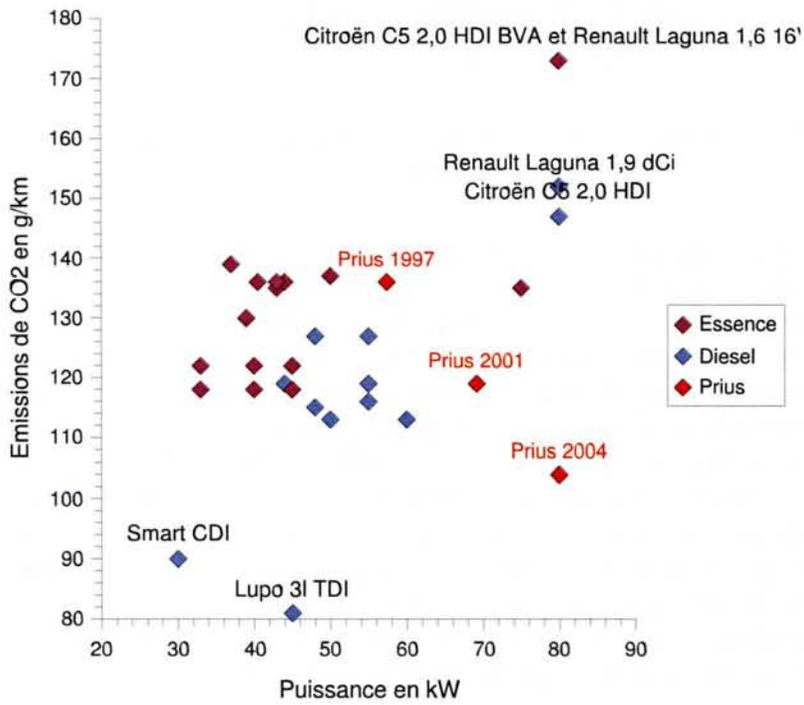


FIG. 2: *Émissions de CO_2 du cycle normalisé européen en fonction de la puissance pour divers véhicules vendus en France*

Quoi qu'il en soit, les objectifs que se fixent les constructeurs lors de l'élaboration d'un véhicule hybride sont les suivants :

- ▷ diminuer tant que possible la consommation de carburant ;
- ▷ respecter les normes actuelles et préparer les futures, concernant les émissions de polluants relevant de la réglementation ;
- ▷ garder un bon agrément de conduite, ou même l'améliorer ;
- ▷ maîtriser les coûts de fabrication pour ne pas trop s'éloigner des prix affichés pour les véhicules de même catégorie ;
- ▷ éventuellement proposer des fonctionnalités supplémentaires.

[3]Par exemple il était plus facile pour Toyota de prendre un risque en lançant la Prius, puisqu'il existe dans la gamme des véhicules du même segment (ex. Toyota Camry).

Le présent mémoire aborde principalement le premier point, c'est-à-dire la problématique de la minimisation de la consommation de carburant.

On a vu que le deuxième point est en grande partie résolu, via les solutions innovantes de post-traitement.

Afin de ne pas s'éloigner de l'usage réel du véhicule, le troisième point sera abordé ponctuellement, en vue de l'implémentation de lois de commande sur banc moteur dynamique. Cependant, l'étude n'a pas été doublée de la réalisation d'un prototype ; or celui-ci paraît être une condition nécessaire à une prise en compte réaliste des contraintes de confort des passagers et de l'agrément de conduite proposé au conducteur.

Le quatrième point, la maîtrise des coûts, a été abordée via l'implémentation d'une configuration hybride parallèle à deux embrayages sur le banc moteur dynamique du Laboratoire Transports et Environnement (LTE) de l'INRETS Bron, comprenant des composants fournis par Valeo et Exide satisfaisant les contraintes du marché de l'automobile.

Ce mémoire s'organise en trois grandes parties.

▷ La première commence dans le chapitre un par une description des composants qui jouent un rôle important dans la chaîne de traction du véhicule hybride. En particulier seront décrites les évolutions et innovations des composants qui :
  ◇ soit rendent leur intégration dans le véhicule hybride plus intéressante ;
  ◇ soit sont indispensables dans le contexte d'une hybridation.

  Dans le second chapitre sont décrites les principales architectures de véhicule hybride, leurs avantages et inconvénients, ainsi que les tendances perceptibles actuellement chez les constructeurs. Le troisième chapitre aborde le problème du dimensionnement du véhicule hybride. Le chapitre quatre pose la problématique sous-jacente aux parties deux et trois.

▷ La deuxième partie constitue le corps de la thèse : elle décrit la mise au point d'un outil d'optimisation nommé KOALA, qui permet de minimiser la consommation à bord du véhicule. Cependant, les consommations qui sont annoncées correspondent à des optima qui ne pourront pas être atteints sur un véhicule réel, cela pour au moins trois raisons :
  ◇ les stratégies calculées le sont à partir de la connaissance de la totalité du parcours a priori, ce qui dans la réalité est bien entendu impossible ;
  ◇ les modèles utilisés pour l'optimisation sont simplifiés (en particulier, les changements de rapport de boîte sont supposés instantanés) ;
  ◇ aucune loi de confort n'a été prise en compte à ce niveau du travail.

  Néanmoins, les résultats de KOALA constituent le pilier de la thèse :
  ◇ ils permettent de fournir le potentiel de gain en consommation du véhicule hybride considéré. C'est en ce sens que KOALA permet de comparer des véhicules toutes choses égales par ailleurs ;
  ◇ ils constituent les fondations de la méthode d'élaboration de lois de gestion en ligne présentée dans la troisième partie.

▷ La partie trois aborde l'élaboration de stratégie utilisables dans la réalité, c'est-à-dire :
  ◇ sans la connaissance du parcours a priori ;
  ◇ avec la prise en compte d'un certain nombre de lois de confort.

  Une démarche par réseaux de neurones est proposée. Sa justification est donnée suite à l'énoncé de conditions suffisantes au contrôle de l'état de charge de la batterie du véhicule hybride.
  À des simulations font suite des résultats de mesure sur banc à rouleau et banc moteur

dynamique.

En annexe P p.225 sont brièvement résumées les diverses publications personnelles en premier ou second auteur (relatives au sujet traité dans ce mémoire).

En annexe A p.169, le lecteur pourra consulter un schéma de principe décrivant brièvement la méthodologie développée dans le cadre de la thèse et de l'étude PARAVH [DRST+04]. Il pourra s'y reporter si des questions concernant la démarche utilisée apparaissaient au cours de la lecture.

Première partie

Véhicules hybrides : définition et problématique

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11

Chapitre 1

Composants utilisés dans les véhicules hybrides

Dans ce chapitre, nous présentons certains composants jouant un rôle fondamental en automobile, et en particulier lorsqu'on s'intéresse au véhicule hybride.

Nous examinerons leur combinaison et le système véhicule dans le chapitre 2 p.19.

1.1 Stockage d'énergie

Le stockage d'énergie est l'élément le plus important du véhicule hybride, en ce sens que tous les gains possibles résultent de l'utilisation plus ou moins pertinente de celui-ci.

De manière générale dans le domaine automobile, deux types de stockage d'énergie sont possibles :

- ▷ réversible. Celui-ci est un élément clef du véhicule hybride, puisqu'il permet par exemple de récupérer l'énergie cinétique du véhicule lors des phases de freinage (voir §2.3) ;
- ▷ irréversible. Pour un véhicule conventionnel, il s'agit du réservoir de carburant (essence, gazole, gaz de pétrole liquéfié, hydrogène, méthane, etc.).

Comme type de stockage réversible, citons :

- ▷ le stockage mécanique, par volant d'inertie. Pour que le stockage soit efficace, le poids et l'encombrement du dispositif réduits, il est préférable que le volant tourne à haute vitesse, plusieurs dizaines de milliers de tr/min. Cela nécessite de maintenir l'enceinte du volant sous vide d'air afin de limiter les pertes aérodynamiques dues à la viscosité de l'air. Néanmoins, pour une application poids lourd, un système composé d'une batterie au plomb et d'un volant d'inertie à faible vitesse de rotation a montré sa supériorité sur le système composé de la batterie seule [Bri02]. La spécificité de l'application et la mauvaise puissance massique des batteries plomb demandent cependant de relativiser ce résultat. D'autre part, la baisse des performances dynamiques du véhicule due à l'augmentation de son poids n'a pas été quantifiée.
- ▷ le stockage électrochimique, par batterie ou supercapacités. Le composant le plus couramment utilisé est la batterie ;
- ▷ le stockage électromagnétique, par bobine supraconductrice. Ceci deviendrait viable si des supraconducteurs à température ambiante voyaient le jour ;
- ▷ le stockage oléopneumatique, via un gaz sous pression.

Parmi ces différents types de stockage réversible, le stockage électrochimique par batterie est actuellement le plus utilisé, nous l'avons donc retenu pour nos travaux sur la gestion d'énergie. On notera que les méthodes employées pourront toutefois s'adapter relativement facilement à d'autres types de stockage.

Habituellement, le constructeur indique une plage d'état de charge préférentielle dans laquelle il est conseillé de faire travailler la batterie, cela pour deux raisons :

- ▷ la durée de vie de la batterie diminue sensiblement lorsque l'amplitude d'utilisation en état de charge augmente. C'est pour cette raison que le nombre de cycles possible pour des batteries de véhicule électrique (grandes profondeurs de décharge) est plus faible que celui obtenu pour des batteries de véhicule hybride (décharge de quelques %) ;
- ▷ un compromis entre les puissances maximum de charge et décharge de la batterie peut être atteint dans une plage d'état de charge donnée, généralement située vers 60%. Ceci est illustré sur la figure 1.1, pour une batterie Lithium-ion fabriquée par Saft. Autre exemple, le constructeur Exide conseille un état de charge de 60% sur sa batterie au plomb Orbital 12V.

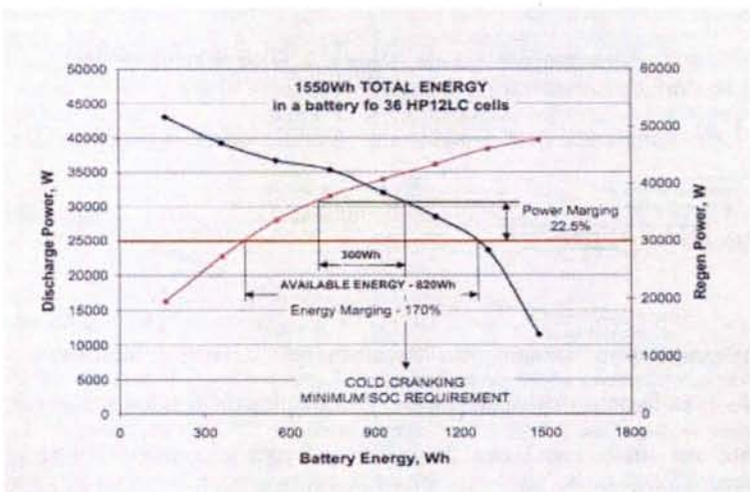


FIG. 1.1: *Batterie Saft Lithium-ion (source : [RCN+03])*

Nous avons indiqué dans le tableau 1.1 les caractéristiques de deux types de batterie utilisés dans le domaine du véhicule hybride. Généralement, une durée de vie en fonctionnement hybride est garantie par le constructeur. De manière générale, les durées de vie annoncées résultent d'essais de vieillissement accéléré. Il est nécessaire de moduler ces chiffres par l'effet du vieillissement calendaire, c'est-à-dire de la dégradation des caractéristiques de la batterie via des phénomènes dont la constante de temps est de l'ordre de l'année.

Selon [BP03], la technologie la plus mature est le NiMH : la baisse de capacité et de puissance à faible température est réduite. En revanche, la durée de vie et le maintien des performances à faible température de la technologie Lithium-Ion restent à améliorer.

La batterie est un objet complexe qu'il est difficile de modéliser de manière fine. À titre d'exemple, citons le calcul de l'état de charge en cours qui peut se révéler difficile, puisqu'il dépend de l'historique des courants débités, ainsi que de celui des températures. À la suite de tests de caractérisation, les constructeurs fournissent généralement des courbes permettant d'évaluer la

Type de batterie	plomb Exide Orbital 12V Deep cycle	nickel-hydrures métalliques (PANASONIC « New Prismatic »)
tension à vide monobloc (V)	14	7.2
capacité (Ah)	40	6,5
énergie massique (Wh/kg)	30	46
puissance massique (W/kg)	200	1300
résistance interne à 1 kHz (mΩ)	3	11.4
masse (kg)	18.6	1.04
dimension (mm)	258 × 178 × 206	285 × 19.6 × 114

TAB. 1.1: *Exemples de caractéristiques actuelles des stockeurs électrochimiques plomb et NiMH*

capacité de la batterie, en fonction de divers paramètres, parmi lesquels la température et la moyenne des courants débités lors de l'utilisation (figure 1.2).

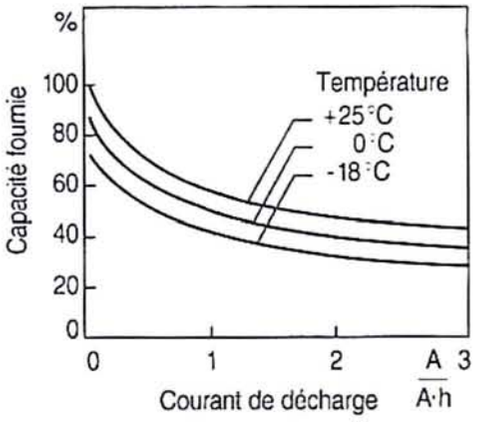


FIG. 1.2: *Capacité fournie par une batterie plomb, en fonction du courant de décharge et de la température (source : guide Bosch [Bos00])*

1.2 Moteur électrique

Lorsqu'on s'intéresse au véhicule hybride ou électrique, plusieurs critères pour le choix du ou des moteurs sont à examiner :

- ▷ le rendement ;
- ▷ la puissance massique et volumique ;
- ▷ le coût de la commande rapprochée associée ;
- ▷ l'entretien.

Les moteurs à courant continu ne sont plus guère utilisés, car :

- ▷ ils ont une puissance massique défavorable et sont d'une construction complexe donc prohibitive ;

- ▷ le système collecteur/balais demande un entretien régulier (pour un véhicule électrique, tous les 10000 km environ selon [Tri97]) ;
- ▷ l'avantage de la simplicité de leur commande est devenu obsolète, depuis l'avènement de composants d'électronique de puissance toujours plus performants et meilleur marché.

Les moteurs utilisés dans la traction automobile aujourd'hui sont principalement de type synchrone à aimant. En effet, ils se démarquent par un rendement et une puissance volumique élevés. De plus, l'absence de bague collectrice permet de minimiser les opérations d'entretien.

Certains prototypes sont à l'étude, notamment à réluctance variable chez Valeo [CSP04]. Cependant, il reste à voir si les désavantages classiques de ce type de technologie, c'est-à-dire les vibrations, les harmoniques à haute fréquence, et les à-coups à basse vitesse, pourront être contournés [Pon00].

Dans le tableau 1.2 sont indiquées les caractéristiques des technologies synchrone et asynchrone [Tri97].

Type de moteur	asynchrone	synchrone	
		à aimant permanent	bobiné
Construction	simple	assez complexe	complexe
Puissance massique et volumique	bon	excellent	médiocre
Rendement	bon	excellent	bon
Fonctionnement à grandes vitesses	excellent	médiocre	bon
Entretien	inutile	inutile	utile
Fiabilité	excellente	bonne	excellente
Coût	moyen	grand	grand

TAB. 1.2: *Caractéristiques générales des moteurs électriques synchrones et asynchrones*

1.3 Moteur thermique

La comparaison des solutions hybrides avec les solutions utilisant des motorisations classiques optimisées est rendue difficile, car l'hybridation apparaît à la fois comme concurrente et bénéficiaire des progrès réalisés dans le domaine des moteurs thermiques.

1.3.1 Principe

Les moteurs thermiques utilisés dans les véhicules modernes sont à combustion interne, et à cycle quatre temps, c'est-à-dire qu'un cycle complet de fonctionnement se déroule sur deux tours de vilebrequin (figure 1.3) : admission, compression, combustion et détente, échappement. L'allumage peut être commandé (moteur utilisant un carburant essence dit moteur essence) ou bien spontané du fait de la compression (moteur utilisant un carburant gazole dit moteur diesel). Dans le cas du moteur essence, l'injection de carburant se déroule au début de la phase d'admission, tandis que pour le moteur gazole elle se situe généralement au point mort haut, en fin de la phase de compression.

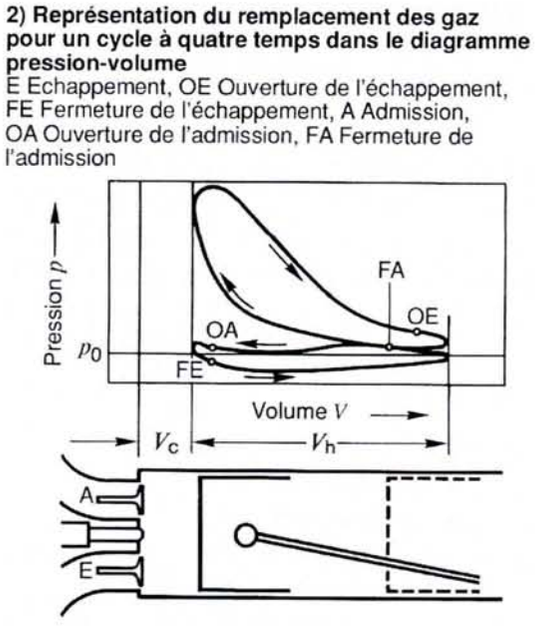


FIG. 1.3: *Description des quatre phases du cycle à quatre temps (allumage commandé) (Source : guide Bosch [Bos00])*

Le moteur diesel possède un meilleur rendement que le moteur essence, mais nécessite une conception plus robuste du fait des pressions plus importantes auxquelles est soumise la chambre de combustion ; il est donc plus lourd et plus cher. D'autre part, il nécessite l'usage d'un filtre à particules, contrairement au moteur essence.

1.3.2 Évolutions récentes et futures

1.3.2.1 Mélange d'admission

Afin d'augmenter la puissance du véhicule à cylindrée égale, le moyen d'action privilégié est l'augmentation de la densité de l'air d'admission. En effet, plus il y aura d'air dans la chambre de combustion, plus la poussée sur le piston sera importante (augmentation du travail fourni sur un cycle). À cet effet, l'approximation des gaz parfaits $\rho = \frac{P}{R \cdot T}$ nous enseigne que l'on peut augmenter la pression ou bien diminuer la température de l'admission.

Ceci peut être réalisé :

- ▷ via un turbocompresseur, qui augmente la pression de l'air d'admission. Son principe est de comprimer les gaz d'admission par un compresseur, qui est entraîné via une turbine située sur le conduit d'échappement. Son utilisation peut être régulée par une vanne de décharge (« waste gate »), ou bien par des ailettes situées à l'entrée de la turbine (turbocompresseur à géométrie variable). Le turbocompresseur permet également de modifier le sens de parcours de la surface du cycle thermodynamique correspondant à l'admission et l'échappement (pertes par pompage), de manière à ce que d'ordinaire résistante elle devienne motrice (figure 1.4). L'utilisation du turbocompresseur est moins répandue sur les véhicules essence car :

◇ elle impose un renforcement de la structure du moteur, ce qui entraîne une augmentation de prix et de poids ;

◇ les pressions dans la chambre de combustion sont limitées par le phénomène de cliquetis, qui se manifeste par une perte de puissance ressentie par le conducteur. Celui-ci correspond à l'ignition spontanée du mélange, non souhaitée dans le cas du moteur essence.

▷ via un échangeur air/air ou air/liquide de refroidissement, qui refroidit l'air d'admission.

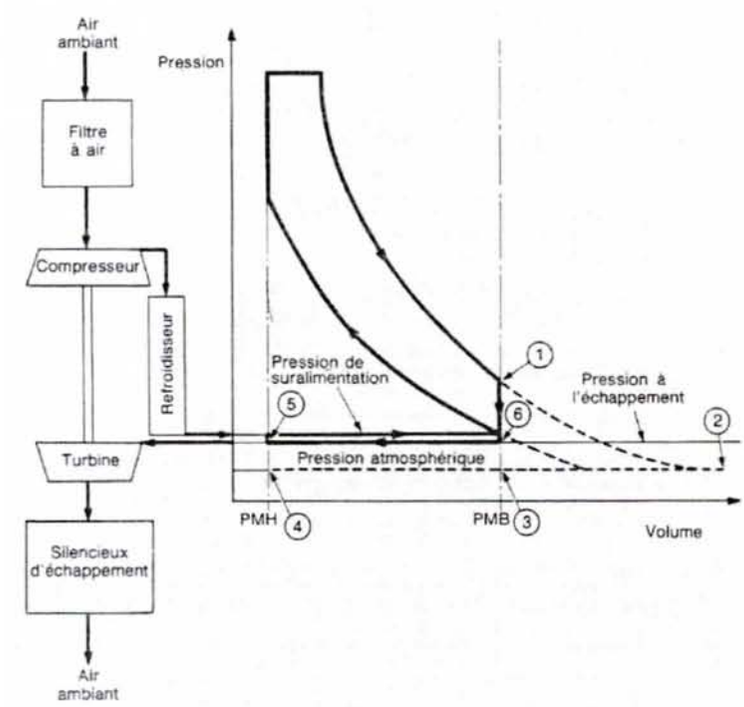


FIG. 1.4: *Schéma de principe du turbocompresseur (source : Techniques de l'Ingénieur)*

Lorsque la densité de l'air d'admission est telle que la combustion ne se déroule plus à stoechiométrie, mais avec un excès d'air, on parle de mélange *pauvre*. Ceci permet par ailleurs de minimiser les émissions d'hydrocarbures imbrûlés (HC).

L'auto-allumage caractéristique des moteurs diesel leur permet de fonctionner en mélange pauvre, contrairement aux moteurs essence qui nécessitent la stoechiométrie pour l'initiation de la combustion par la bougie.

Les constructeurs réussissent depuis peu à faire travailler des moteurs essence en mélange pauvre, à l'aide d'injection par « charge stratifiée » : une zone à stoechiométrie est conservée à proximité de la bougie, le reste de la chambre pouvant se trouver en mélange pauvre (e.g. Honda Insight).

De plus, l'inconvénient du mélange pauvre est l'augmentation de la température dans la chambre de combustion, ce qui entraîne une surproduction de NO_x, qu'il est nécessaire d'éliminer. Deux solutions sont possibles :

▷ le piège à NO_x, qui doit être régénéré périodiquement par des phases de fonctionnement à stoechiométrie ;

▷ diluer le mélange frais en recyclant une partie des gaz d'échappement (EGR : Exhaust Gas Recirculation), le processus étant régulé par la vanne EGR. Ceci permet de diminuer la température de flamme par augmentation de la capacité calorifique du mélange présent dans le cylindre.

À titre d'exemple, un synoptique détaillé du circuit d'air du moteur équipant le Peugeot 806 HDI 110 ch est présenté sur la figure 1.5.

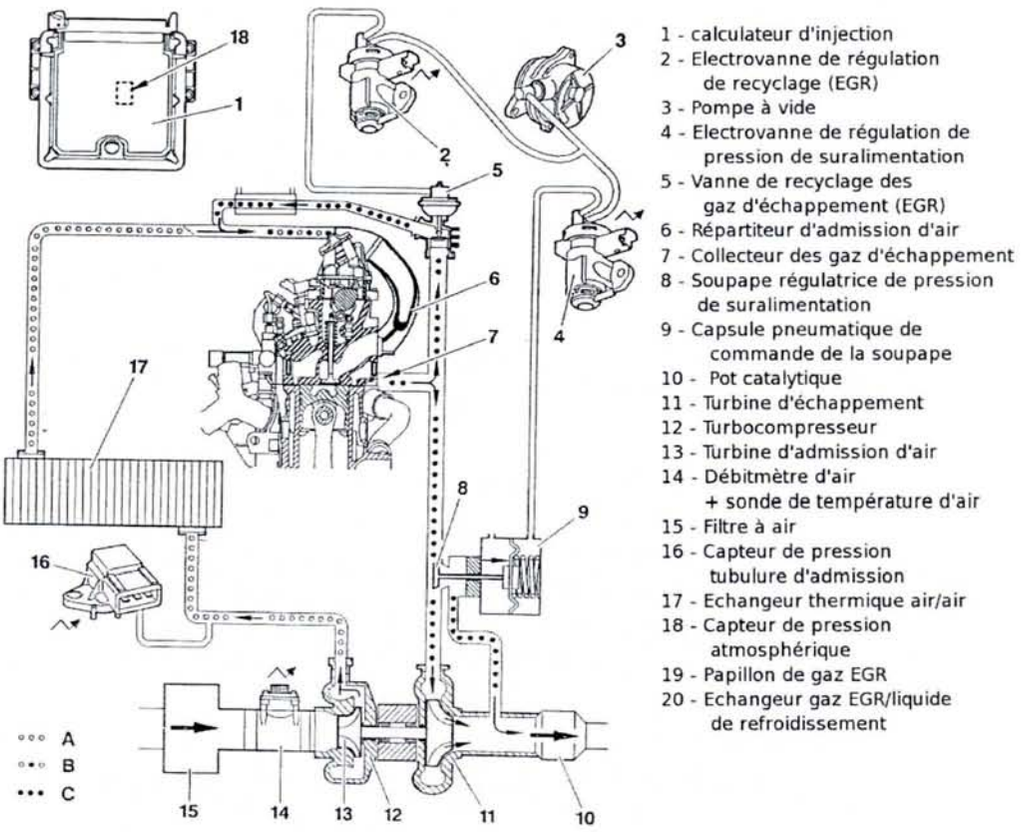


FIG. 1.5: *Synoptique du circuit d'air du moteur équipant le Peugeot 806 HDI 110 ch (source : revue technique automobile).*

1.3.2.2 Distribution

Sur les véhicules actuels, les soupapes d'admission et d'échappement sont entraînées par l'arbre à came. Ceci ne permet d'optimiser le rendement et la puissance du moteur que pour un régime donné[4].

Certains moteurs actuels (e.g. moteur essence de la Toyota Prius) utilisent déjà des systèmes qui permettent de contrôler partiellement le mouvement des soupapes d'admission, ce qui permet de réaliser une optimisation du remplissage[5] sur une plage de régime du moteur thermique plus

[4]En réglant l'avance à l'ouverture à l'admission (AOA), le retard à la fermeture de l'échappement (RFE), le retard à la fermeture de l'admission (RFA), et l'avance à l'ouverture de l'échappement (AOE).

[5]Quantité d'air admise.

importante. Les prochaines générations de véhicule devraient utiliser des soupapes électromagnétiques, afin d'optimiser le remplissage sur toute la plage de régime du moteur thermique.

1.3.2.3 Mode d'injection

Dans le cas du moteur diesel, elle est aujourd'hui réalisée en injection directe à haute pression (1200 à 2000 bars), par une rampe commune (« common rail »). Les intérêts sont multiples :

- ▷ on obtient un meilleur mélange, dû à l'atomisation du carburant sous forme de « spray », obtenu par passage dans un orifice de très petite taille ;
- ▷ un phénomène de saturation du débit permet de contrôler la quantité de carburant injectée uniquement en réglant le temps d'injection par rapport à la pression dans la rampe ;
- ▷ l'injection est réalisée à un ou des moments très précis du cycle, grâce au fort débit. Ainsi on contrôle parfaitement l'instant et le développement de la combustion.

Le réglage de la pression dans la rampe commune est réalisé via une vanne de régulation haute pression.

Dans le cas des moteurs essence, l'usage de l'injection directe est beaucoup moins répandu, et seuls quelques modèles ont été commercialisés à ce jour.

1.3.2.4 Rapport volumétrique de compression

D'un rapport volumétrique de compression[6] compris entre 20 et 22 sur les moteurs diesel actuels, la tendance est aujourd'hui de le diminuer. En effet, les constructeurs cherchent plutôt à augmenter le rendement via la pression de l'air d'admission (§1.3.2.1). En effet, plus le rapport volumétrique de compression est élevé, plus la chambre de combustion doit être robuste, donc plus grand est le coût de fabrication.

Dans le cas du moteur essence, le rapport volumétrique de compression est plus faible, du fait de la contrainte due au phénomène d'auto-allumage générateur de cliquetis destructeur.

1.3.2.5 Post-traitement

Pour les moteurs essence, la sévérisation des normes européennes a imposé l'usage de post-traitement catalytique depuis le début des années 90.

Aujourd'hui sont utilisés des catalyseurs 3 voies, qui permettent de filtrer les HC, CO, et NO_x.

Une autre problématique dans le cas du véhicule diesel est l'émission de particules fines, qui peuvent se fixer dans les poumons, et dont l'effet n'est pas encore connu. Celles-ci sont retenues par un filtre à particule (FAP). Le principe du FAP consiste à piéger et stocker les particules sur un filtre puis, périodiquement, à les brûler. La combustion naturelle des particules s'effectue vers 550 °C alors que la température initiale des gaz d'échappement est de 150 °C en sortie de collecteur. Citroën influe aujourd'hui sur ces deux températures via :

[6] Le rapport volumétrique de compression est égal au volume de la chambre du cylindre entre le début et la fin de la phase de compression. Celui-ci n'est pas forcément égal au rapport du volume au point mort bas sur le volume au point mort haut, car dans certains cas, le piston remonte dans le cylindre alors que la soupape d'admission n'est pas fermée (e.g. cycle Atkinson-Miller de la Prius).

- ▷ une post-injection en phase de détente qui crée une postcombustion dans le cylindre, ce qui entraîne une hausse de la température des gaz de 200 à 250 °C (soit 350 à 400 °C) ;
- ▷ une post-combustion complémentaire, générée par un catalyseur d'oxydation placé en amont du filtre, qui traite les hydrocarbures imbrûlés issus de la post-injection. La température peut augmenter de 100 °C (soit 450 à 500 °C) ;
- ▷ une additivation du carburant par le cerium, composé produit par la firme chimique Rhodia. Il permet d'abaisser la température naturelle de combustion des particules à 450 °C. Tous les 80000 km, l'entretien du filtre consiste à remplir le réservoir de 5 l.

1.4 Transmission

Le rôle de la transmission est de communiquer aux roues les forces de traction nécessaires au déplacement du véhicule. Les organes de transmission doivent satisfaire aux exigences suivantes :

- ▷ permettre l'immobilisation du véhicule même quand le moteur thermique tourne ;
- ▷ permettre le démarrage du moteur thermique en le désolidarisant de l'ensemble ;
- ▷ convertir le couple et la vitesse de rotation ;
- ▷ permettre à deux roues motrices opposées de tourner à des vitesses différentes en virage.

La première et la deuxième fonction sont assurées en désaccouplant le moteur thermique du reste de la transmission soit par un embrayage, soit en mettant la boîte de vitesse au point mort. La suivante est assurée par un organe démultiplicateur (souvent une boîte de vitesse), qui adapte le couple et le régime du moteur thermique en fonction de l'effort de traction exigé à la roue. La dernière est accomplie via le différentiel, qui de plus possède un rapport de transmission de l'ordre de 4.

Lorsqu'on s'attache à la consommation, l'organe démultiplicateur est fondamental, dans la mesure où il permet d'imposer les points de fonctionnement du moteur thermique.

1.4.1 Organe démultiplicateur

L'organe démultiplicateur est le plus souvent une boîte de vitesses multi-étagée à engrenages, et plus rarement une transmission à variation continue (CVT). Deux types de boîtes de vitesses à engrenages prédominent : les boîtes de vitesses classiques à trains d'engrenage parallèles et les boîtes à train épicycloïdal.

Les recherches récentes dans le domaine de la CVT se heurtent aux problèmes de viscosité de l'huile à faible température. De plus les pertes de vitesse et de couple sont plus importantes que sur une boîte classique [Dum02].

En revanche, le train épicycloïdal a trouvé une application idéale à travers l'hybride parallèle à dérivation de puissance (Toyota Prius) (voir §2.11).

1.4.2 Courroie

L'évolution des matériaux employés dans la fabrication des courroies permet de faire transiter des couples de plus en plus importants, repoussant ainsi la nécessité d'utilisation des chaînes.

Afin d'assurer la tension de la courroie, en particulier compenser son vieillissement, on utilise un ou plusieurs tendeurs, pour obtenir un fonctionnement en alterno-démarreur sans glissement [CSP04].

En mode alternateur la courroie doit assurer un rôle de filtrage des acyclismes du moteur thermique. Sur des alternateurs de forte inertie, il est possible de placer une poulie à roue libre[7], ce qui n'est pas possible dans le cas d'un alterno-démarreur, du fait du fonctionnement réversible en couple.

1.4.3 Embrayage

L'embrayage a deux fonctions essentielles :

- ▷ permettre l'accouplement progressif entre le moteur thermique et le reste de la transmission ;
- ▷ filtrer les vibrations en torsion provenant des acyclismes du moteur thermique. Ceci est réalisé via des amortisseurs de torsion, la plupart du temps associés à un volant d'inertie intercalé entre le moteur thermique et l'embrayage. Ce dernier est généralement constitué de deux parties séparées par un élément élastique (volant bi-masse).

1.5 Réseau électrique de bord

1.5.1 Récepteurs électriques

On distingue généralement trois types de récepteurs électriques suivant leur mode d'utilisation :

- ▷ permanents (e.g. allumage, injection) ;
- ▷ longue durée (e.g. éclairage, dégivrage) ;
- ▷ courte durée (e.g. feux clignotants, démarreur, direction assistée).

Certains récepteurs absorbent des puissances conséquentes, et jouent donc un rôle important dans le dimensionnement électrique du véhicule :

- ▷ le démarreur, généralement constitué d'un moteur à courant continu, d'un engrenage, et d'un dispositif à roue libre ;
- ▷ éventuellement la climatisation électrique si le véhicule en est équipé (voir §1.6).

La puissance de ces composants influence directement la puissance nominale de la batterie et celle de l'alternateur.

1.5.2 Alternateur et réseau électrique de bord

Les alternateurs utilisés dans l'automobile sont en règle générale du type synchrone avec rotor à griffes. Un enroulement d'excitation est placé au rotor, relié au circuit extérieur via une bague collectrice[8].

[7] Qui consiste à transmettre le couple ou pas, suivant la valeur du différentiel des vitesses alternateur et moteur thermique.

[8] Le collecteur n'est pas à lamelles comme sur les machines à courant continu, ce qui évite la scintillation électromagnétique.

La quantité d'énergie pouvant être générée par kg de masse d'alternateur augmente avec sa vitesse de rotation moyenne. Il convient donc de choisir un rapport de démultiplication aussi élevé que possible, néanmoins limité supérieurement par les éléments suivants [Bos00] :

- ▷ les forces centrifuges à haut régime, agissant sur les bobinages du rotor ;
- ▷ le bruit du ventilateur (externe dans le cas d'un rotor à griffes), qui de manière générale constitue une contrainte importante lors de la conception de la machine ;
- ▷ la répercussion des vitesses de rotation élevées sur la durée d'utilisation des pièces d'usure (paliers, bagues collectrices, balais) ;
- ▷ la baisse de rendement aux régimes élevés ;
- ▷ le moment d'inertie de l'alternateur peut entraîner des sollicitations importantes sur le vilebrequin et la courroie dans les phases transitoires ;
- ▷ à haut régime, les pertes mécaniques dues au ventilateur.

Le rapport de démultiplication varie entre 1 :2 et 1 :5 suivant le type de véhicule. L'alternateur subit les acyclismes du moteur thermique, ce qui peut représenter des accélérations de plusieurs centaines de g en périphérie des bobinages rotoriques. Il est soumis par ailleurs à des agressions diverses (pollution, sel d'épandage en hiver, etc.) ; lors de la conception ont lieu des essais de vieillissement accéléré.

La tension du réseau électrique de bord ne doit pas varier dans des limites trop importantes, par exemple pour la durée de vie et l'intensité lumineuse des appareils d'éclairage. Quand la puissance électrique consommée par les accessoires est importante, il faut donc limiter la chute de tension au niveau de la batterie (chute de tension due à sa résistance interne). C'est pourquoi la plus grande partie du courant consommé par les accessoires du véhicule doit provenir de l'alternateur, la batterie se contentant de subvenir aux pics de courant supplémentaires, en particulier lors du démarrage quand l'alternateur n'est pas encore en fonctionnement. Pour ce faire, la tension délivrée par le redresseur en sortie d'alternateur (c'est-à-dire la tension batterie) est régulée en commandant le courant d'excitation. Ceci est réalisé via un hacheur abaisseur alimentant l'inducteur (figure 1.6). Ce circuit est conçu de façon compacte afin de pouvoir être placé sur l'alternateur, du côté opposé au ventilateur si celui-ci est externe.

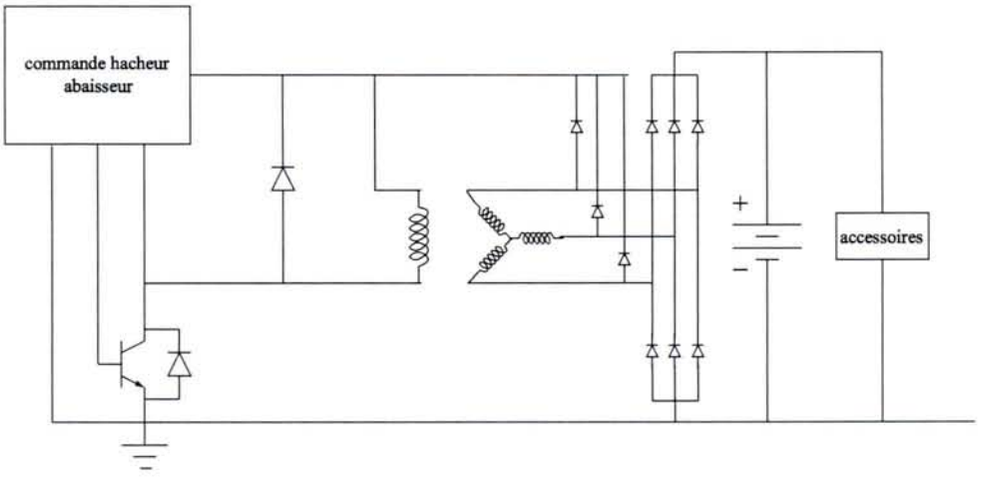


FIG. 1.6: *Circuit du réseau de bord : alternateur et sa commande, batterie, accessoires*

Si l'on remplace l'alternateur et le démarreur par une seule machine, il est nécessaire d'assurer la réversibilité du circuit présenté sur la figure 1.6. Pour cela, il suffit de remplacer le pont redresseur côté batterie par un pont à transistors.

1.5.3 Choix de la tension du réseau électrique : 14 ou 42V

La multiplication des équipements de sécurité et de confort, dont beaucoup d'entre eux sont électriques (on compte environ 120 moteurs électriques auxiliaires sur un véhicule haut de gamme [BDRT+04]), a entraîné ces dix dernières années une augmentation de la consommation du réseau électrique de bord de 150 W/an [Fra03]. Dans ce contexte, des problèmes sont apparus à la fin des années 90 :

- ▷ les courants aux bornes de la batterie peuvent dans les phases de grosse consommation électrique devenir intolérables, en termes de puissance et/ou de capacité (décharge excessive) ;
- ▷ l'alternateur doit pouvoir fournir une puissance électrique également en constante augmentation, la technologie classiquement employée (alternateur à griffes refroidi à air) semblant être limitée aux alentours de 3kW ;
- ▷ les pertes par effet Joule augmentent de manière quadratique par rapport au courant, ce qui fait baisser le rendement global du réseau électrique dans des proportions relativement importantes.

Notons que le premier problème peut être résolu si l'on déporte la consommation des accessoires sur l'alternateur plutôt que sur la batterie, mais alors le second problème s'en trouve accentué.

Afin de diminuer les courants sur la batterie, certains constructeurs pratiquent la redondance comme Mercedes-Benz sur sa 500SL : une seconde batterie est placée dans le coffre, dédiée à l'alimentation des accessoires électroniques et électriques, tandis que la batterie traditionnelle est utilisée pour le démarrage du moteur thermique. Cela permet aussi de placer tous les composants sensibles sur la batterie des accessoires, plus stable en tension. Cependant, ce système ne semble pas acceptable sur des véhicules d'entrée et de moyenne gamme, l'espace disponible à bord étant un argument de vente décisif.

Néanmoins, des équipementiers comme Valeo s'intéressent à la possibilité de mettre deux batteries en série pour le démarrage du moteur thermique, et en parallèle pour le fonctionnement en mode alternateur [CSP04]. Ceci permet de disposer d'un démarrage plus rapide tout en gardant les accessoires 14V traditionnels. Il est alors nécessaire d'utiliser un système régulant l'égalisation de charge entre les deux batteries (voir annexe M p.197).

Dans ce contexte, certains constructeurs ont proposé à la fin des années 90 le passage à un réseau électrique de bord 36-42V au lieu du réseau 12-14V classique [9][10]. Ceci permettrait :

- ▷ de diminuer les contraintes de courant sur la batterie, par ailleurs de plus forte capacité ;
- ▷ de diminuer les pertes par effet Joule dans les câbles ainsi que les composants de puissance. Dans le cas des câbles, cela peut permettre de diminuer leur section, dans la limite d'une augmentation tolérable de la résistivité. Pour les composants d'électronique de puissance, le refroidissement serait facilité, et dans certains cas, un simple radiateur suffirait [GAPDMDS04], là où il aurait auparavant fallu un refroidissement par fluide caloporteur ;
- ▷ d'augmenter la puissance de l'alternateur tout en gardant le même type de refroidissement.

[9] Aujourd'hui, la tension de régulation à bord des véhicules est généralement dans la plage 13.8±0.4V. Nous désignerons donc dans la suite les tensions des batteries par 14V et 42V au lieu de 12/14V et 36/42V.

[10] Notons que la dernière augmentation de tension remonte aux années 1960 avec le passage de 6 à 12V [Kah04].

Cependant le 42V amène des problèmes technologiques, par exemple une plus grande difficulté à éteindre les arcs électriques dans les relais lors de la commutation de circuits inductifs.

De plus, l'ensemble des accessoires à bord du véhicule étant dimensionnés pour une tension de 14V, cela implique soit de revoir la conception de tous les accessoires, soit d'utiliser un convertisseur DC/DC 14V/42V pour réaliser la conversion de l'énergie électrique (beaucoup de topologies différentes sont possibles [Kah04]). La deuxième solution est moins coûteuse, mais encore beaucoup plus chère que la solution 14V longuement éprouvée [Fra03]. Celui-ci a entraîné une remise en cause du passage au 42V par les constructeurs et équipementiers, allant dans le sens de l'amélioration des solutions existantes.

Si l'on en croit [Fra03], la solution la plus intéressante à court et moyen terme serait de rester dans une architecture de type 14V, et :

- ▷ d'une part de disposer d'un alternateur de plus forte puissance de sortie, jusqu'à 5 kW. En effet, l'expérience acquise grâce à l'élaboration de prototypes 42V a permis de développer des machines 14V de meilleur rendement, celui-ci pouvant passer de 50 à 80%, via :
  - ◇ l'amélioration de la machine elle-même d'une part (optimisation des structures, insertion d'aimants, etc.) ;
  - ◇ l'amélioration de l'électronique de puissance d'autre part. Citons la technique du redressement synchrone qui consiste à remplacer les diodes conventionnelles ou Schottky par des interrupteurs MOS à faible résistance à l'état passant. La chute de tension s'en trouve diminuée, et donc plus globalement le rendement du convertisseur amélioré de plusieurs points [Zwi98].

  Par exemple, l'utilisation conjuguée de ces techniques permet à Valeo d'annoncer une amélioration de 10 à 12% sur le rendement de leur alterno-démarreur 12V « Stars ». Le rendement maximum dépasse les 80%, et les capacités en fonctionnement moteur sont améliorées.

  Grâce à l'amélioration du rendement, une même puissance mécanique au niveau de la poulie d'alternateur correspond à une puissance électrique sur le réseau plus importante.
- ▷ d'autre part d'augmenter le rendement énergétique des accessoires électriques, par exemple via de nouvelles technologies. À titre d'exemple, citons les lampes à base de diodes électroluminescentes qui consomment dix fois moins d'énergie que les lampes à incandescence classique, tout en étant moins volumineuses.

Selon le même auteur, le passage à 42V serait cependant inéluctable à long terme, l'électrification progressive de fonctions actuellement mécaniques aidant. En particulier, Valeo Climate Control préconise le passage à 42V pour les accessoires les plus consommateurs (chauffage électrique et pulseur de climatisation par exemple), ou bien l'électrification en 42V de composants habituellement mécanisés, afin d'augmenter le rendement de ces appareils. C'est en particulier vrai pour le compresseur de climatisation dont l'électrification permettrait une augmentation de rendement substantielle [GAPDMDS04].

Selon [Kah04], les coûts supplémentaires dus au passage à 42V ne peuvent être acceptés par le consommateur que s'il apporte de nouvelles fonctionnalités et/ou une consommation de carburant réduite.

1.6 Le problème de la climatisation

1.6.1 Problématique générale[11]

Depuis quelques années, la climatisation se généralise sur les véhicules particuliers. La surconsommation de carburant correspondante est élevée, et pourrait bien compenser l'ensemble des efforts réalisés pour baisser la consommation unitaire des véhicules [Jou02, RDL+79]. Ainsi, selon [BCR98], la surconsommation due à la climatisation serait de 1.8 l/100 km (resp. 2.5 l/100 km) en moyenne sur cycle urbain et 0.6 l/100 km (resp. 0.9 l/100 km) en extra-urbain pour un véhicule à essence (resp. diesel), pour une température de consigne de 20°C et une température extérieure de 30°C.

De plus, les fuites de gaz frigorifique tout au long de la vie du véhicule, mais aussi lors de son assemblage et son démantèlement, constituent un impact environnemental important. Le fréon (famille des clorofluorocarbone, CFC), utilisé jusqu'en 1992, était particulièrement nocif pour la couche d'ozone, alors que ses remplaçants, de la famille des hydrofluorocarbures (HFC), le sont pour leur contribution à l'effet de serre : 1 g de HFC équivaut à 1.3 kg de CO_2. C'est pourquoi les équipementiers concentrent leurs efforts afin de remplacer les HFC. Le meilleur candidat est le CO_2 ; cependant, les pressions nécessaires sont élevées, et imposent un renforcement du système. Cela représente un surcoût estimé à 150 € [CB03].

1.6.2 La climatisation pour le véhicule hybride

L'une des améliorations apportées par l'hybridation, i.e. l'arrêt du moteur thermique lorsque le véhicule est stoppé, constitue un problème pour la climatisation. En effet, le compresseur étant inutilisable, la régulation de température de l'habitacle ne peut être assurée de manière conventionnelle. Deux solutions sont possibles :

- ▷ étendre le fonctionnement de la climatisation classique quelques minutes après l'arrêt du moteur thermique. Valeo Climate Control propose le système « Stop Stay Cool » qui permet de minimiser la remontée de la température dans l'habitacle. Le système est basé sur l'énergie de transition de phase d'un fluide caloporteur ;
- ▷ utiliser une climatisation électrique plutôt que mécanique. Selon [GAPDMDS04], le rendement d'un système de climatisation électrique (compresseur électrique), même en tenant compte de la chaîne de rendement entre l'alternateur, la batterie, l'onduleur et le moteur, serait de 44%. Avec les mêmes hypothèses de modélisation, un système mécanique actuel aurait un rendement de 29%. La différence est principalement due à la souplesse du système électrique, obtenue grâce au découplage du compresseur et du moteur thermique. Celle-ci permet d'optimiser le système d'un point de vue thermodynamique. D'autres avantages subséquents apparaissent, parmi lesquels un meilleur maintien de la température de l'habitacle à l'arrêt du véhicule par rapport à un système mécanique, et une réduction du volume de la chambre de compression d'un facteur proche de dix, grâce aux vitesses élevées du moteur électrique.

Finalement, la balance semble très favorable à l'électrification de la climatisation qui, selon la plupart des auteurs, nécessite le passage à 42V.

Un autre avantage substantiel pourrait être la possibilité d'optimiser la gestion de la climatisation en parallèle de celle des moments de recharge de la batterie par l'alternateur, afin de minimiser la

[11] Le principe de la climatisation automobile est rappelé en annexe C p.175.

consommation de carburant (voir §10.1.3 p.109). Cela pose alors le problème du dimensionnement de la capacité batterie.

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11
54601 VILLERS-LES-NANCY Cédex

Chapitre 2

Principales architectures de véhicules hybrides

Lorsqu'on s'intéresse au véhicule hybride, il est intéressant de préciser de quoi celui-ci est constitué, en quoi il diffère du véhicule traditionnel. Dans un premier temps, on tentera d'établir une taxinomie des véhicules étant ou ayant été commercialisés, dans le cadre du véhicule hybride. Dans un second temps, on évoquera les tendances actuelles des constructeurs lorsqu'il s'agit de la conception d'un véhicule hybride.

2.1 Tentative de classification des véhicules

Une condition nécessaire pour qu'un véhicule puisse être qualifié d'hybride est que sa chaîne de traction comprenne au moins deux sources d'énergie de nature différente. Ceci implique la présence d'au moins deux convertisseurs énergétiques à bord. Jusqu'à ce stade, il existe un consensus. On ne peut toutefois considérer cette condition nécessaire comme suffisante, sans quoi un véhicule conventionnel pourrait être assimilé à un hybride. En effet, il embarque également à son bord un réservoir de carburant et une batterie, associés à un moteur thermique et à un démarreur (ou alternateur). Il est donc courant d'imposer une ou plusieurs conditions supplémentaires. Cependant, il semble que :

- ▷ [Ven01, Dub02, Del02] ne précisent pas de condition supplémentaire ;
- ▷ [Pag99, SDW00] imposent à au moins l'une des sources d'énergie d'être réversible, ce qui ne permet toujours pas de différencier le véhicule conventionnel du véhicule hybride.

Il est vrai que certains termes n'ont pas toujours besoin d'être bien définis pour que leur sens soit compris par la majorité. Néanmoins, nous proposons deux alternatives quant à la définition du véhicule hybride :

- ▷ « Un véhicule hybride est un véhicule disposant d'au moins deux sources d'énergie, et dont au moins deux participent à la traction du véhicule » ;
- ▷ « Un véhicule hybride est un véhicule disposant d'au moins deux sources d'énergie, et pourvu d'au moins une des fonctionnalités suivantes : optimisation de la gestion énergétique des accessoires, start/stop, récupération au freinage, « boost » et mode tout électrique[12] ». Ces fonctionnalités sont détaillées en §2.3.

[12] Dans le cas d'un véhicule hybride thermique électrique doté d'un mode tout électrique.

La première définition a un point faible, en ce sens qu'un véhicule pourvu d'une capacité de récupération au freinage [13], mais dont le moteur électrique ne peut participer à la traction, ne peut être considéré comme véhicule hybride.

La seconde définition revient à opposer le véhicule hybride au véhicule « conventionnel » qui a cours depuis des années, via l'ajout d'un plus ou moins grand nombre de fonctionnalités. Ainsi, un véhicule réalisant uniquement un mode start/stop sera donc considéré comme hybride. Cela semble plus en accord avec le monde industriel, puisque les équipementiers et constructeurs qualifient le véhicule start/stop de « micro-hybride » [CSP04, HEV04c].

Notons que lorsque nous parlerons de moteur électrique, cela ne présupposera pas de son usage en fonctionnement générateur ou moteur. On sera donc en présence d'une « machine électrique ».

Notre étude se limitera au cas des chaînes de traction hybrides thermiques-électriques, c'est-à-dire dont le convertisseur primaire d'énergie est un moteur thermique, et le convertisseur secondaire (réversible) est un moteur électrique alimenté par une batterie. Nous parlerons de « véhicule hybride thermique électrique » (VHTE)[14].

Notons que certaines recherches portent sur d'autres types de véhicules hybrides. Par exemple l'EPA (United States Environment Protection Agency) travaille sur des propulsions de type thermique hydraulique.

Dans ce contexte, il paraît pertinent de réaliser une classification des véhicules montrant le niveau d'hybridation de la classe considérée. Celui-ci peut être décrit :

- ▷ d'une part via le taux d'hybridation du véhicule, que nous définirons plus bas ;
- ▷ d'autre part via la capacité de la batterie, c'est-à-dire la capacité d'utilisation du réseau électrique de bord sans effectuer de recharge compensatrice sur le réseau électrique domotique.

À ce titre, nous reprenons la classification présentée dans [Dub02], dans une version simplifiée adaptée à notre vocabulaire (figure 2.1). Quatre classes de véhicules sont représentées dans le plan puissance du moteur thermique fonction de la capacité de stockage électrique :

- ▷ les véhicules thermiques conventionnels ;
- ▷ les VHTE précédemment évoqués ;
- ▷ les véhicules électriques, qui ne comportent pas de moteur thermique. Les constructeurs français disposent de véhicules électriques dans leur gamme depuis le début des années 90. Sauf rupture technologique dans le domaine de la batterie, ils ne semblent pouvoir correspondre qu'à une solution de niche, celle des véhicules effectuant de courts trajets en ville, à zéro émission [MLK01] ;
- ▷ les véhicules électriques avec prolongateurs d'autonomie (« range extender »). Ces véhicules disposent d'une batterie de forte capacité, avec possibilité de recharge via un moteur thermique de relativement faible puissance. Ceci peut donc contrebalancer le principal défaut des véhicules électriques, à savoir leur autonomie.
  À titre d'exemple, citons le véhicule NVNX, qui devrait être commercialisé en 2006, à un coût estimé de 12000 €. Sur la base d'une Opel Meriva cinq places, Dassault et Heuliez ont développé un véhicule électrique doté de batteries au lithium d'une autonomie de 200 km en ville, celle-ci étant allongée de 500 km grâce à la présence d'un moteur d'appoint d'une cyclindrée de 500 cm^3.

[13] On peut considérer que la récupération au freinage existe déjà dans les véhicules conventionnels.

[14] Notons que cette définition est différente de celle employée dans [Dub02] où une condition nécessaire pour parler de VHTE est la possibilité de rouler en tout électrique sur une distance « significative ». Cette condition n'apparaît pas dans la définition présentée par Volkswagen dans [MLK01].

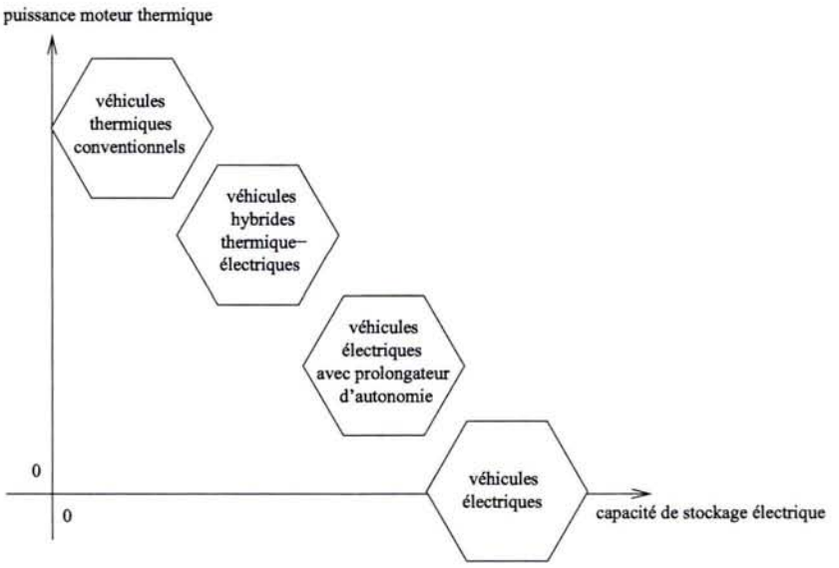


FIG. 2.1: *Classification des véhicules*

Les différentes architectures de VHTE ainsi que leur fonctionnement sont détaillés par la suite (en particulier, en §2.5). De plus, une terminologie du véhicule hybride est donnée dans un lexique fourni en annexe B p.171.

Le concept de VHTE a été développé avec un ou plusieurs des objectifs suivants [BJTH01] :

- ▷ améliorer les conditions de fonctionnement du moteur à combustion interne, et ainsi baisser sa consommation, c'est-à-dire les émissions de CO_2 du véhicule ;
- ▷ préparer la transition vers un réseau électrique de bord haute puissance et tension ;
- ▷ permettre au véhicule d'être utilisé en mode tout électrique, sans émissions locales ;
- ▷ préparer la transition vers la consommation d'autres ressources énergétiques que le pétrole en utilisant le vecteur électricité.

2.2 Système de représentation

Nous avons utilisé dans ce document, pour représenter la chaîne de traction des véhicules hybrides et leurs divers modes de fonctionnement, la convention proposée par l'International Energy Agency (IEA) [SDW00], en donnant cependant plus de détails dans la représentation de l'architecture. En particulier, nous avons décidé de représenter l'organe de démultiplication (ex. : boîte de vitesse), à cause de son rôle fondamental dans le traitement de l'énergie mécanique transitant vers la roue (répartition couple/vitesse dans la puissance).

Néanmoins, les convertisseurs d'électronique de puissance ne seront pas représentés. En effet, lorsqu'on s'intéresse à la compréhension du fonctionnement du véhicule hybride d'un point de vue systémique, la séparation entre le moteur électrique et son convertisseur n'est pas nécessaire. Le traitement de l'énergie électrique peut donc être ignoré dans une première approche.

On trouvera sur la figure 2.2 la schématique adoptée pour la représentation des divers composants du véhicule hybride. Des exemples d'utilisation conjointe sont donnés par la suite.

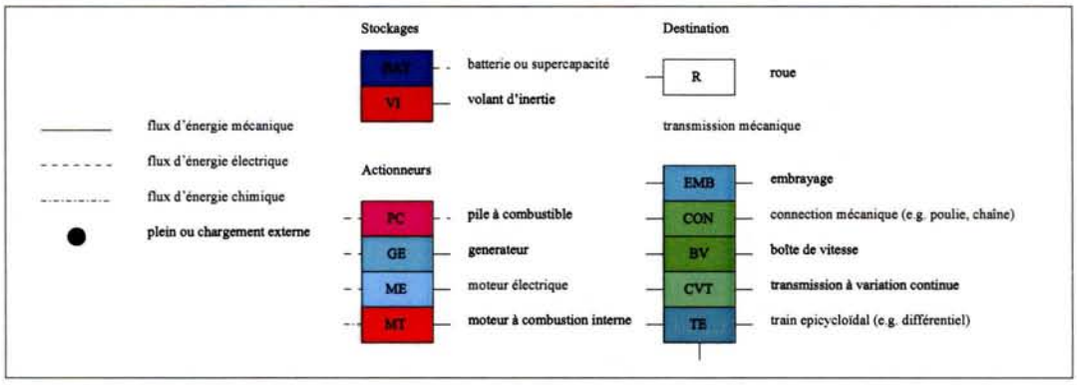


FIG. 2.2: *Mode de représentation de divers composants du véhicule hybride*

2.3 Principales fonctionnalités des véhicules hybrides

Les véhicules hybrides disposent d'un plus ou moins grand nombre de fonctionnalités dont ne profitent pas les véhicules conventionnels. Par la présence d'une ou plusieurs de ces fonctionnalités, il est possible de définir le niveau d'hybridation du véhicule.

On peut représenter dans le plan puissance du moteur électrique fonction de la puissance du moteur thermique l'ensemble des modes de fonctionnement possibles pour un véhicule hybride (figure 2.3) :

- ▷ certains de ces modes interviennent dans la seconde définition du véhicule hybride, nous les détaillons dans les prochains paragraphes : c'est le cas de la récupération au freinage, du "boost" et du mode tout électrique ;
- ▷ le flux série existe déjà dans le véhicule thermique conventionnel. Il consiste à recharger la batterie en utilisant le moteur thermique.

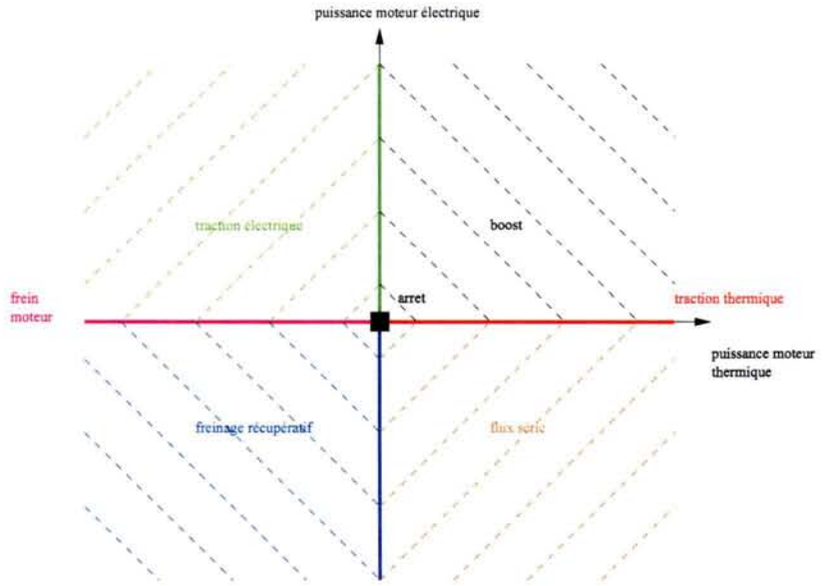
2.3.1 Optimisation de la gestion d'énergie des accessoires électriques

Sur un véhicule conventionnel, la recharge de la batterie est réalisée via l'alternateur, par régulation de la tension de la batterie (voir §1.5.2 p.12). Quand la puissance des accessoires augmente, la simplicité de ce procédé entraîne une augmentation de consommation de carburant prohibitive.

Si l'on tolère que l'état de charge batterie se déplace dans une plage plus importante, il est possible d'optimiser les moments de recharge par rapport aux points de fonctionnement du moteur thermique. Le gain en consommation peut être substantiel, comme nous le verrons dans le chapitre 9.

2.3.2 Start/stop

Dans un contexte d'amélioration des équipements, le nombre d'accessoires électriques à bord des véhicules augmente, ce qui se traduit par une augmentation de la consommation globale du réseau de bord (voir §1.5 p.12). En conséquence, afin de maintenir l'état de charge de la batterie, l'alternateur est plus sollicité. Il est donc naturel d'augmenter sa puissance. Le couple qu'il peut



S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11

FIG. 2.3: *Modes de fonctionnement d'un véhicule hybride dans le plan puissance du moteur électrique fonction de la puissance du moteur thermique*

fournir à faible vitesse de rotation est alors en mesure de démarrer le moteur thermique[15], d'où la possibilité de supprimer le démarreur conventionnel [Rei99]. Si le couple est suffisante, le temps de démarrage peut diminuer jusqu'à 0.2 s [PCLDvW01, Vis04, Del04][16]. Le démarrage étant rapide et silencieux, il devient possible d'arrêter le moteur thermique dans certaines conditions (arrêt au feu rouge par exemple). Cette fonctionnalité est communément appelée « start/stop »[17]. En théorie il aurait été possible de réaliser du start/stop sur un véhicule pourvu d'un démarreur classique ; dans les faits, il s'avère que le démarrage est trop long (de l'ordre de 1s), et bruyant, ce qui rend son utilisation régulière inconfortable pour le conducteur. De plus, dans ces conditions la longévité du système constitué du lanceur, du démarreur, et de la batterie, n'est plus assurée.

Il existe des procédés permettant d'accélérer le démarrage et le rendre plus silencieux :

- ▷ repérer la position du vilebrequin afin d'optimiser l'injection lors du démarrage ;
- ▷ si cela est possible, garder les soupapes d'admission ouvertes plus longtemps avant le début de la compression, afin de diminuer le couple de traînée du moteur thermique. Ceci peut être réalisé par synchronisation variable des soupapes (« Variable Valve Timing ») comme sur la Prius, ou bien via des soupapes électromagnétiques.

La fonctionnalité start/stop doit pouvoir être inhibée dans certaines conditions :

- ▷ moteur thermique en phase de montée de température ;
- ▷ température du catalyseur trop faible, à la limite de son désamorçage ;

[15]Le dimensionnement de l'alterno-démarreur et de son éventuelle courroie est conditionné par le démarrage du MT, dans les conditions de températures les plus basses. Pour des moteurs de grosse cylindrée, le couple de démarrage nécessaire peut atteindre 400 Nm.

[16]Voir l'annexe I p.189 pour des éléments de réponse quant au dimensionnement du moteur électrique et/ou de la courroie correspondante.

[17]Ou « Stop and Go », mais il semble que cette dernière appellation ait été déposée par Volkswagen.

▷ batterie trop déchargée, nécessité de la recharger à l'arrêt.

Dans la pratique, l'arrêt du moteur thermique est réalisé lorsque le conducteur agit sur la pédale de frein jusqu'à arrêt du véhicule. Le moteur est redémarré lorsqu'il relâche la pédale de frein et appuie sur l'accélérateur. Il est possible d'anticiper l'arrêt du moteur thermique lors de la phase de décélération, ou au contraire d'attendre 1s après l'arrêt complet du véhicule [SMSW02].

Sur la première version de Prius, l'arrêt du moteur thermique était interdit au-delà de 50 km/h [?].

Généralement, l'injection de carburant débute vers 500 tr/min de vitesse vilebrequin. Sur la Prius, l'injection ne commence qu'au régime de ralenti (vers 900 tr/min), le moteur électrique amenant seul le moteur thermique jusqu'à cette vitesse (ceci étant facilité par la réduction du couple de traînée via la synchronisation variable des soupapes d'admission).

Sur la Polo 1.4l « Stop & Go » développée par Valeo et testée sur le banc à rouleau de l'INRETS en 2000, le moteur est maintenu en marche à l'arrêt du véhicule lorsque la température du liquide de refroidissement est inférieure à 65° [CSP04]. Les gains de consommation mesurés sont compris entre 5% et 15% suivant le cycle considéré [Har00].

2.3.3 Récupération d'énergie au freinage

Dans les cycles d'usage réel urbains et péri-urbains, et pour un véhicule de gamme moyenne, la plupart des décélérations représentent des puissances inférieures à 10 kW, ce qui correspond sur un véhicule conventionnel à l'utilisation du frein moteur pour les vitesses véhicule faibles. Les freinages à vitesse élevée ou les freinages d'urgence correspondent à des puissances mises en jeu beaucoup plus fortes, où le frein mécanique devra obligatoirement intervenir [Rei99].

De nombreux facteurs réduisent l'énergie susceptible d'être récupérée au freinage [BDRT+04] :

▷ les niveaux de puissance en décélération sont élevés, et peuvent se situer au-delà de la puissance maximum du système électrique de stockage. Une récupération appréciable nécessitera donc des systèmes de forte puissance comme les supercondensateurs ou des associations batterie-supercondensateur ;

▷ seule une partie de l'énergie cinétique peut être récupérée, car les contraintes de dynamique du véhicule conduisent à répartir le freinage sur les deux essieux. Notons qu'une plus grande part de l'énergie est récupérable sur l'essieu avant[18]. Des constructeurs comme Toyota sur son Estima proposent par ailleurs une machine électrique sur l'essieu moteur, permettant notamment de maximiser la récupération au freinage et d'améliorer la dynamique du véhicule [SSSO02] ;

▷ pour les architectures comprenant une boîte de vitesses, la rupture du couple transmis à chaque changement de rapport ;

▷ le rendement des composants mécaniques et électriques par lesquels transitent l'énergie de récupération ;

▷ l'acceptance de charge de la batterie, dépendant principalement de son état de charge, son vieillissement, et de sa température ;

▷ le couple résistant du moteur thermique dans les architectures où celui-ci ne peut être désaccouplé du moteur électrique. Notons qu'il est possible de réduire cette traînée avec une com-

[18] Du fait du transfert de masse sur l'essieu avant, par rotation du véhicule autour du point de contact des roues avant avec le sol, il est possible d'appliquer une plus grande force de freinage sur les roues avant sans glissement.

mande adaptée des soupapes. Comme on l'a déjà vu en §2.3.2, Toyota utilise ce système pour faciliter le démarrage du moteur thermique.

2.3.4 Assistance électrique à la traction ou « boost »

Cette fonction correspond à l'utilisation du moteur électrique pour fournir du couple, qui vient alors s'additionner à celui du moteur thermique pour propulser le véhicule. Ceci ne sera donc possible que si la batterie est suffisamment chargée pour alimenter le moteur électrique.

Selon certains équipementiers, le boost est intéressant si le moteur électrique est d'assez forte puissance : au-delà de 5 kW selon certains [PCLDvW01], au-delà de 10 kW selon d'autres [Rei99]. Les Honda Civic IMA (« Integrated Motor Assist ») et Insight proposent le boost avec un moteur électrique développant un peu plus de 10 kW.

2.3.5 Mode tout électrique

Dans ce mode de fonctionnement, le véhicule peut être propulsé par le moteur électrique seul, le moteur thermique étant arrêté. Ceci ne sera donc possible que si l'architecture permet de déconnecter le moteur thermique de la chaîne de traction, par exemple via un embrayage. Le fonctionnement en mode tout électrique est géré par le calculateur de bord. Les conditions de mise en oeuvre sont généralement les suivantes :

- ▷ relativement faible demande d'accélération du conducteur ou mode ZEV actionné par le conducteur (paragraphe suivant 2.4) ;
- ▷ respect des conditions précédemment évoquées concernant la fonctionnalité start/stop. En particulier, le moteur thermique doit avoir atteint une température minimale.

Le mode électrique peut être limité aux premières secondes de démarrage du véhicule (« décollage en tout électrique »), éliminant ainsi la contrainte du temps nécessaire à la mise en action du moteur thermique. Le moteur électrique est tout particulièrement adapté à cet usage car il fournit son couple maximum à bas régime.

De plus, le moteur thermique peut ensuite être démarré via l'inertie du véhicule , par collage progressif de l'embrayage (« démarrage inertiel »). Ceci peut rendre obsolète la contrainte de démarrage du moteur thermique pour le dimensionnement du moteur électrique ; néanmoins un moteur électrique pouvant décoller le véhicule sera a priori déjà d'une puissance importante.

2.4 Autres fonctionnalités des véhicules hybrides

D'autres fonctionnalités, que l'on qualifiera de « secondaires » peuvent être présentes sur les véhicules hybrides. Elles pourraient cependant constituer des atouts pour des VHTE dont le prix reste encore élevé. Parmi celles-ci, citons :

- ▷ le mode ZEV : il s'agit d'un mode tout électrique non pas dicté par le calculateur du véhicule, mais choisi par une action directe du conducteur, voire par un système externe (balise sur la chaussée, système de positionnement GPS, etc.). Celui-ci peut être tout particulièrement intéressant dans les centre-villes interdits aux véhicules conventionnels, comme c'est le cas pour le centre-ville de Londres. L'autonomie en mode électrique est compatible avec les centres

urbains denses européens (10 à 20 km pour le prototype Citroën Dynactive). Des véhicules avec autonomie plus importante sont à l'étude aux États-Unis (jusqu'à 100 km) ;

- ▷ la recharge de la batterie grâce au réseau d'électricité domestique (« plug-in hybrid »). Elle permet un partage de la consommation entre le carburant fossile traditionnel et le mix de production électrique du pays ou de la zone géographique considéré ;
- ▷ la fourniture d'énergie électrique pour l'alimentation d'équipements de type domotique (e.g. 220V monophasé en France). Le prototype Citroën Dynalto possédait cette fonctionnalité. Le General Motors Silverado qui doit être diffusé en 2004 proposera 4 prises 120V pour une puissance maximum de 2,4kW ;
- ▷ assistance durant les changements de rapport. Cette fonction fait intervenir le couple du moteur électrique afin de maintenir l'effort de traction pendant les changements de rapport de boîte. Ceci n'est possible que si le moteur électrique est situé sur l'arbre secondaire de la boîte de vitesse. Certains constructeurs envisagent d'intégrer un moteur électrique à l'intérieur même de la boîte de vitesse ;
- ▷ amortissement des acyclismes du moteur thermique. Il s'agit de lisser les oscillations de couple dues aux combustions qui ont lieu dans les cylindres du moteur thermique, en commandant le moteur électrique de manière adéquate, en particulier à vitesse faible où l'énergie cinétique du volant d'inertie est insuffisante. Cela permettrait également de rejeter une éventuelle fréquence de résonance située en-dessous de **600 tr/min**. D'autres solutions sont envisagées depuis des années, telles que les embrayages glissants (perte de vitesse inférieure à **100 tr/min**) combinant un amortisseur de torsion et n'introduisant pas de glissement pour les vitesses supérieures à **1500 tr/min** ;
- ▷ synchronisation active lors des changements de rapport de boîte, afin de gagner en confort et en rapidité. Dans ce but, les puissances électriques à fournir peuvent être néanmoins élevées [Rei99] ;

Les trois premières fonctionnalités sont plus proches du conducteur que celles citées en §2.3, dans le sens qu'il peut directement interagir avec. Elles sont par conséquent intéressantes d'un point de vue marketing, puisqu'elles permettent au véhicule hybride de se différencier *visiblement* du véhicule thermique conventionnel [BDRT+04].

Cependant, certaines restrictions sont à prendre en compte :

- ▷ le mode ZEV nécessite une batterie de forte capacité, ce qui peut entraîner un surcoût important. On peut imaginer qu'il soit couplé avec le mode de recharge par le réseau ;
- ▷ un véhicule avec recharge de la batterie par le réseau électrique souffre d'un manque de visibilité lorsqu'on considère son coût d'exploitation (répartition de taxes entre carburant et électricité) ou son bilan environnemental (nécessité d'un bilan local et global). Idéalement il faudrait proposer au conducteur l'affichage instantané de la consommation d'un véhicule thermique conventionnel à usage équivalent ;
- ▷ le nombre d'appareils électriques de type domotique intéressants à embarquer dans un véhicule semble assez limité (e.g. chargeur d'ordinateur portable, outillage, éclairage de secours). De plus, la capacité batterie devrait être adaptée à la puissance totale maximum embarquable ;
- ▷ certaines études tenderaient à montrer que les couples nécessaires à l'amortissement des acyclismes du moteur thermique sont effectivement très élevés et imposent l'utilisation d'un moteur électrique de forte puissance, supérieure à **20 kW**. Cela pourrait également entraîner une augmentation de la consommation du moteur thermique [Rei99].

2.5 Architectures et fonctions usuelles

On classe communément les VHTE en trois groupes différents, correspondants à leur architecture : série, parallèle, et série-parallèle[19].

Dans la suite de §2.5, on examinera pour chacune d'elle les diverses fonctions hybrides disponibles, leurs avantages et leurs inconvénients.

Un tableau récapitulatif est présenté en §2.5.5.

2.5.1 Architecture série

2.5.1.1 Description

Dans un hybride série, il n'y a jamais de couplage mécanique des énergie provenant des différentes sources présentes à bord.

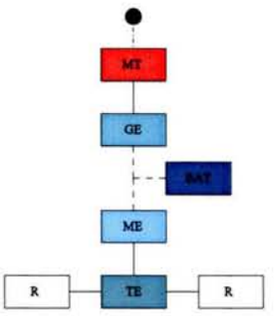


FIG. 2.4: *Architecture hybride série*

L'hybride série comprend une batterie, un groupe électrogène (moteur thermique associé à une génératrice électrique), et un ou plusieurs moteurs électriques qui actionnent les roues (figure 2.4). Ces moteurs sont alimentés :

- ▷ soit par la batterie ;
- ▷ soit directement à partir de la puissance électrique générée par le groupe électrogène ;
- ▷ soit par les deux.

La batterie est rechargée :

- ▷ soit par ces mêmes moteurs électriques lors des phases de récupération au freinage ;
- ▷ soit via le groupe électrogène (flux série) ;
- ▷ soit par les deux.

Notons que dans une première approche, l'hybride série peut être confondu avec le véhicule électrique à prolongateur d'autonomie (« range extender ») décrit en §2.1. La différence fondamentale vient de ce que le véhicule « range extender » possède une batterie de plus forte capacité que l'hybride série, rendant l'utilisation du moteur thermique marginale.

Il est également possible de ne pas utiliser de batterie, on obtient alors un véhicule dit « diesel-électrique ». Celui-ci n'est pas un véhicule hybride, puisqu'il ne comprend qu'une seule source d'énergie, à savoir le réservoir de carburant.

[19] Ou encore : architecture « combinée », ou « parallèle à dérivation de puissance ».

2.5.1.2 Avantages et inconvénients

Cette architecture possède deux caractéristiques antagonistes :

- ▷ le moteur thermique peut fonctionner sur ses meilleurs points de rendement, ou au pire sur sa courbe de puissance optimale, car il est mécaniquement déconnecté de la roue, et donc de la dynamique du véhicule ;
- ▷ l'énergie servant à la propulsion du véhicule a transité via le moteur thermique, la génératrice électrique, le ou les moteurs électriques de traction, et éventuellement la batterie. Ceci correspond à une cascade de rendements, dont le produit se trouve peu avantageux par rapport à d'autres architectures, parallèle par exemple.

Pour des caractéristiques de composant standards, la littérature stipule que le deuxième aspect prédomine, c'est-à-dire qu'à performances équivalentes, le véhicule hybride série consomme plus de carburant que les autres architecture [MLK01].

Néanmoins, aux faibles vitesses véhicule, la souplesse de commande des moteurs électriques rend l'hybride série intéressant, par rapport aux architectures ne permettant pas de mode tout électrique. En effet, les motorisations conventionnelles présentent de mauvais rendements dans ces conditions d'usage, d'autant plus dégradés que l'utilisation de l'embrayage est nécessaire.

Un autre avantage de l'hybride série est sa relative facilité de commande.

Finalement, l'argument décisif en défaveur de l'hybride série semble être le coût : pour obtenir des performances dynamiques correctes, il est nécessaire d'installer trois machines de puissances sensiblement identiques.

L'hybride série trouve donc naturellement ses applications pour des véhicules d'usage spécifiquement urbain, comme les autobus où il permet d'obtenir des gains de consommation importants sur des cycles très lents (20% mesuré pour un bus hybride série en usage dans le centre de New York).

2.5.2 Architecture parallèle

Dans un hybride parallèle, le couplage entre les différentes sources d'énergie est de nature mécanique. L'architecture parallèle offre un grand nombre de possibilités de couplage des composants, les principales sont détaillées ci-après.

Contrairement à un hybride série, le moteur thermique est connecté mécaniquement aux roues, ce qui ne permet pas de choisir son régime de fonctionnement indépendamment de la vitesse du véhicule. Cependant, grâce à l'addition de couple avec le moteur électrique, il est possible de choisir dans une certaine mesure son couple de fonctionnement[20].

2.5.2.1 Parallèle un embrayage avec moteur électrique côté moteur thermique[21]

Cette architecture est représentée sur la figure 2.5.

Le moteur électrique peut être monté coaxialement au vilebrequin (« alterno-démarreur intégré »), ou bien être mis en lieu et place de l'alternateur à courroie conventionnel. Ceci est fondamentalement différent puisque le rapport de courroie permet une plus grande latitude dans

[20] Les architectures parallèles à dérivation de puissance seront abordées en §2.5.3.

[21] Sous-entendu : « côté moteur thermique par rapport à l'embrayage »

le dimensionnement du moteur électrique, réalisé, rappelons-le, par rapport à la contrainte de démarrage du moteur thermique à faible température. Comme pour un alternateur classique, le rapport de courroie est démultiplicateur, ce qui permet de diminuer la taille du moteur électrique. Ce rapport est néanmoins limité, pour les mêmes raisons que l'alternateur classique (§1.5.2 p.12). Une simple courroie en V peut être suffisante si les couples à transmettre sont relativement faibles. Pour des cylindrées du moteur thermique plus importantes, une courroie dentée est parfois nécessaire, ce qui peut être critique d'un point de vue acoustique. Une solution peut être d'obtenir un rapport de réduction plus important en mode démarreur qu'en mode alternateur (e.g. via des systèmes comprenant un ou plusieurs trains épicycloïdaux, avec frein et embrayage, tels ceux qu'on peut trouver dans les boîtes de vitesses automatiques). Notons que pour garder une tension de courroie correcte autant en fonctionnement moteur qu'en alternateur, certains équipementiers proposent des solutions à deux tendeurs [CSP04].

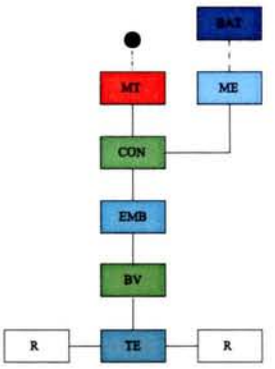


FIG. 2.5: *Architecture parallèle un embrayage avec moteur électrique côté moteur thermique*

Les avantages de cette architecture sont les suivants :

- ▷ si intégré, le ME peut remplacer la première partie du volant d'inertie double masse (« double-mass flywheel ») utilisé sur les véhicules modernes [Rei99] ;
- ▷ si non-intégré, peu de modifications sont à apporter au bloc moteur. En particulier, la courroie est d'un accès relativement facile.

Ses inconvénients sont les suivants :

- ▷ dans le cas où le ME est de type intégré, la contrainte de démarrage du moteur thermique implique que son couple soit relativement important ;
- ▷ rupture du couple de traction lors des changements de rapport ;
- ▷ le MT est toujours couplé au ME. Son couple de traînée vient donc limiter l'énergie récupérable au freinage. De plus, le mode tout électrique est impossible.

Des exemples de commercialisation de véhicules hybrides parallèles un embrayage avec moteur électrique côté moteur thermique sont les Honda Insight et Civic IMA (figure 2.6).

2.5.2.2 Parallèle un embrayage avec moteur électrique sur le primaire de la boîte de vitesse

Cette architecture est représentée sur la figure 2.7. Elle diffère de la précédente par le fait que l'embrayage est maintenant placé entre le moteur thermique et le système de couplage.

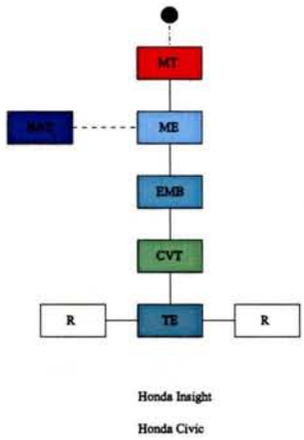


FIG. 2.6: *Architecture des Honda Insight et Civic IMA*

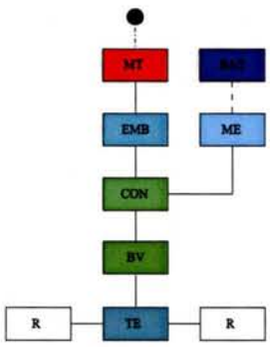


FIG. 2.7: *Architecture parallèle un embrayage avec moteur électrique côté boîte de vitesse*

Les avantages de cette architecture sont les suivants :

- ▷ mode tout électrique possible, et donc également le démarrage inertiel ;
- ▷ dans le cas non-intégré, accessibilité de la courroie si le moteur électrique se trouve en bout de l'arbre primaire de la boîte de vitesse ;
- ▷ la synchronisation des rapports de boîte peut être réalisée via le moteur électrique. Ceci permet en théorie d'enlever l'embrayage : c'est alors le moteur électrique qui amène le moteur thermique à la vitesse de synchronisme. Néanmoins cela est difficile à réaliser dans la pratique, et de plus dans ce cas la récupération au freinage est diminuée par le couple de traînée du moteur thermique ;
- ▷ plus grand potentiel de récupération au freinage, par suppression du couple de traînée du moteur thermique.

Ses inconvénients sont les suivants :

- ▷ séquence « start » longue :
  1. mise de la boîte de vitesse au point mort ;
  2. démarrage du moteur thermique grâce au moteur électrique ;
  3. débrayage ;
  4. passage premier rapport ;
  5. embrayage.

  C'est pourquoi il est préférable dans cette architecture de garder le démarreur conventionnel.
- ▷ rupture du couple de traction lors des changements de rapport ;
- ▷ si le moteur électrique n'effectue pas de synchronisation active lors des changements de rapport de boîte, son inertie doit être absorbée par les cônes de glissement avant crabotage ;
- ▷ des problèmes de réalisation pratique se posent quant à la suppression des acyclismes du moteur thermique, lorsqu'on s'intéresse au démarrage inertiel [Rei99] :
  - ◇ si le volant d'inertie côté moteur thermique n'est pas suffisamment important, la conception de l'embrayage va s'en trouver plus compliquée. En effet les variations de couple dues aux acyclismes du MT vont s'y retrouver presque en totalité ;
  - ◇ si l'on utilise un volant d'inertie côté moteur thermique trop important (éventuellement avec un amortisseur de torsion), le démarrage inertiel s'en trouve plus difficile, avec éventuellement un effet de jerk (variation de l'accélération) sensible par les passagers. Un palliatif peut être un temps d'engagement de l'embrayage plus long.

2.5.2.3 Parallèle un embrayage avec moteur électrique sur le secondaire de la boîte de vitesse

Cette architecture est représentée sur la figure 2.8. Elle diffère de la précédente par le fait que le couplage des deux sources est réalisé sur le secondaire de la boîte de vitesse, ce qui induit les remarques suivantes :

- ▷ le moteur électrique peut assister le véhicule lors des changements de rapport de boîte, ce qui permet d'éliminer la rupture du couple de traction lors des changements de rapport. Cela améliore le confort de conduite ;
- ▷ le moteur électrique ne peut pas réaliser la synchronisation des rapports de boîte ;
- ▷ le moteur électrique doit être en mesure de fournir des couples importants, car il ne bénéficie pas du rapport de réduction de la boîte de vitesse ;

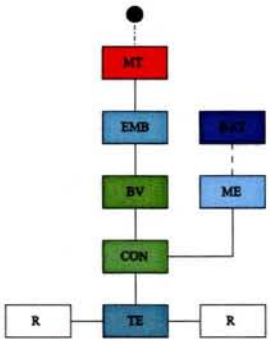


FIG. 2.8: *Architecture parallèle un embrayage avec moteur électrique sur le secondaire de la boîte de vitesse*

▷ il est nécessaire de conserver un démarreur conventionnel, ainsi qu'un alternateur afin d'alimenter les accessoires électriques en phase de stop lorsque la batterie est déchargée.

2.5.2.4 Parallèle deux embrayages

Cette architecture est représentée sur la figure 2.9. Il s'agit d'une combinaison des solutions présentées sur les figures 2.5 et 2.7, et qui utilise donc deux embrayages.

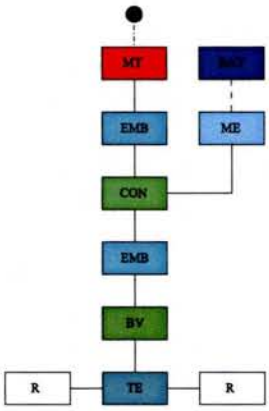


FIG. 2.9: *Architecture parallèle deux embrayages*

Les avantages de cette architecture sont les suivants :

▷ démarrage inertiel possible ;
▷ plus grand potentiel de récupération au freinage, par suppression du couple de traînée du moteur thermique.

Ses inconvénients sont les suivants :

▷ accessibilité courroie ;
▷ complexité de mise en oeuvre ;
▷ rupture du couple de traction lors des changements de rapport ;

▷ même problèmes de réalisation pratique que pour l'architecture parallèle un embrayage avec moteur électrique sur le primaire de la boîte de vitesse (cf §2.5.2.2)

2.5.3 Architecture parallèle à dérivation de puissance

L'hybride parallèle à dérivation de puissance combine les principes de fonctionnement des architectures parallèle et série, les deux fonctionnements étant possibles indépendamment ou simultanément.

L'idée principale est d'utiliser le véhicule en tout électrique à basse vitesse, afin de ne pas faire fonctionner le moteur thermique dans ses zones de mauvais rendement. À haute vitesse ou puissance à la roue, le moteur thermique est allumé afin de participer à la traction

Trois machines (moteur thermique, génératrice électrique, moteur électrique) et une batterie sont nécessaires, mais le moteur électrique peut être de plus faible puissance que dans un hybride série, car une part des puissances des moteurs thermique et électrique peuvent être additionnées (fonctionnement parallèle).

La dérivation de puissance peut être réalisée de diverses manières, mais dans tous les cas elle nécessite deux machines électriques (dans le cas d'un stockage électrique) : il faut prélever de la puissance mécanique à un endroit de la chaîne de traction (e.g. avec une génératrice électrique), et la réinjecter à un autre endroit (e.g. avec un moteur électrique). Sur la Toyota Prius, la dérivation de puissance est réalisée via un train épicycloïdal (figure 2.10).

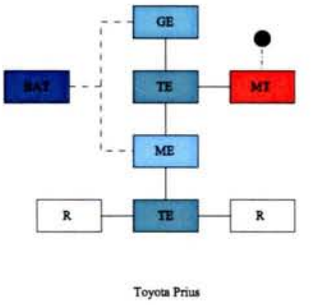


FIG. 2.10: *Architecture d'un hybride parallèle à dérivation de puissance : la Toyota Prius*

En résumé, l'hybride parallèle à dérivation de puissance possède un potentiel important de gain en consommation ; néanmoins, les coûts additionnels par rapport au véhicule conventionnel semblent plus élevés que dans le cas de l'hybride parallèle. Les premiers véhicules hybrides ayant été commercialisés par les constructeurs nippons Nissan et Toyota sont des configurations parallèles à dérivation de puissance : la Tino et la Prius.

La Tino a été commercialisée à 200 exemplaires avant le rachat de Nissan par Renault ; son succès a été mitigé, de par son prix élevé et des gains de consommation réduits. En revanche, la Prius semble être dans sa troisième version (2004) une réussite technique et peut-être même commerciale [DRB04].

2.5.4 Architecture à motorisation répartie

Dans une architecture à motorisation répartie, les essieux (ou même les roues) disposent chacun(e) d'un système de propulsion propre, les différents systèmes étant mécaniquement indépendants. Un tel concept a été proposé par Renault dès 1996 sur la Next, avec deux moteurs électriques de 7 kW sur chacune des roues arrières.

Ce concept est particulièrement adapté pour les véhicules à 4 roues motrices, car il est alors aisé de répartir le couple sur les roues en gérant les fonctions d'antiblocage (ABS) et antipatinage (ASR), ainsi que les glissements différentiels.

Par exemple, il est possible de réaliser un véhicule 4×4 à partir d'un véhicule conventionnel à traction, auquel on rajoute un moteur électrique sur l'essieu arrière (figure 2.11). En arrêtant et débrayant le moteur thermique, le véhicule peut décoller et rouler en mode tout électrique. Les phases de transition et leur impact sur la tenue de route du véhicule sont néanmoins à examiner soigneusement.

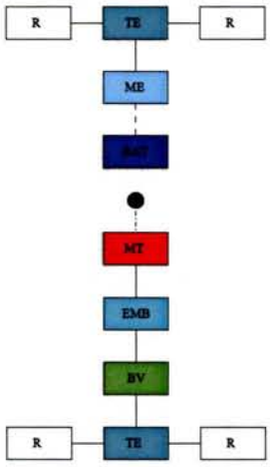


FIG. 2.11: *Architecture à motorisation répartie*

2.5.5 Tableau récapitulatif

Le tableau 2.1 synthétise les avantages et inconvénients des différentes architectures que nous avons abordées.

2.6 Classification quantitative des VHTE suivant le taux d'hybridation

Suivant la puissance relative des machines électriques et thermiques, on peut définir un « niveau d'hybridation » du VHTE. Il est pertinent de séparer l'hybridation en deux parties, l'une décrivant la capacité en fonctionnement de type hybride parallèle, l'autre la capacité en fonctionnement autonome sur batterie :

fonction	Avantages	Inconvénients
série	- bon rendement aux faibles vitesses (idéal pour usage urbain) par rapport à un véhicule thermique conventionnel - relative facilité de commande -mode tout électrique avec de bonnes performances dynamiques -bonne récupération au freinage - confort d'utilisation	- moins bon rendement aux autres vitesses (usage extra-urbain) - nécessite trois machines de forte puissance
parallèle un embrayage machine électrique côté moteur thermique	- peu de modifications à apporter à la chaîne de traction	- couple de traînée du MT - pas de mode tout électrique - rupture de couple lors des changements de rapport
parallèle un embrayage machine électrique sur le primaire de boîte de vitesse	- mode tout électrique - débrayage MT	- modification de la boîte de vitesses - inertie du moteur électrique lors des changements de rapport (si pas de synchronisation active) - rupture de couple lors des changements de rapport
parallèle un embrayage machine électrique sur le secondaire de la boîte	- maintien de la motricité lors des changements de rapport -mode tout électrique - débrayage moteur thermique	- dimensionnement en couple du moteur électrique - démarreur et alternateur conservés
parallèle deux embrayages	- mode tout électrique - débrayage moteur thermique afin d'augmenter l'énergie récupérable au freinage	- complexité de commande du système - rupture de couple lors des changements de rapport
parallèle à dérivation de puissance	- pas de rupture de couple lors des changements de rapport - fonctionnement pouvant se rapprocher de l'hybride série	- trois machines de puissance importante

TAB. 2.1: *Résumé des avantages et inconvénients des diverses architectures présentées*

$$R_P = \frac{P_{ME}}{P_{MT} + P_{ME}}$$

$$R_B = \frac{P_B}{P_B + P_{MT}}$$

P_B, P_{MT}, P_{ME} sont respectivement les puissances maximales de la batterie, du moteur thermique, et du moteur électrique (voir liste des symboles et notations en début d'ouvrage).

Les expressions de R_P et R_B sont inspirées de définitions données dans la littérature [Ber98] :

- ▷ R_P est égal à 0 lorsqu'il n'y a pas de moteur électrique à bord (« hybridation parallèle nulle ») ;
- ▷ R_B prend en compte le cas du véhicule diesel électrique (hybride série sans batterie), où l'on trouvera $R_B = 0$ [22].

2.7 Classification des VHTE indépendante de l'architecture considérée

Pour des raisons d'efficacité dans la compréhension de leur message, constructeurs et équipementiers utilisent une classification des VHTE indépendante de l'architecture considérée, qui distingue trois types d'hybrides :

- ▷ le « MICRO-HYBRID ».
  Selon Valeo [CSP04] et Ricardo [HEV04c], il s'agit d'un véhicule muni d'un alterno-démarreur avec fonction start/stop (à l'image de la Toyota Crown THS-M). Il est également doté d'une fonction de récupération au freinage, mais ne peut pas assister le moteur thermique (« boost »).
- ▷ le « MILD HYBRID ».
  - ◇ Selon Valeo [CSP04] , il s'agit d'un véhicule hybride muni de la fonction « boost » au moins (à l'image de la Honda Civic).
  - ◇ Selon [CSP04, HEV04c], c'est un véhicule dont la puissance du moteur électrique est inférieure à 10% de la puissance du moteur thermique.
- ▷ le « FULL HYBRID ».
  - ◇ Valeo [CSP04] propose de nommer ainsi un véhicule hybride capable de réaliser du mode tout électrique. La Toyota Prius est présentée comme un full hybrid, bien que sa capacité en mode tout électrique soit de quelques centaines de mètres seulement.

Par ailleurs, un autre type de classification considérant les fonctions complémentaires apportées par l'hybridation a été proposée dans [BDRT+04] :

- ▷ les HYBRIDES DISCRETS intègrent une ou plusieurs des fonctionnalités présentées en §2.3 p.22 (optimisation de la gestion des accessoires, start/stop, récupération au freinage, boost, mode tout électrique) mais aucune des trois premières fonctionnalités présentées en §2.4 (mode ZEV, recharge réseau, réseau embarqué de type domotique). Le conducteur n'est donc pas censé savoir que le véhicule qu'il conduit est hybride. Il pourrait néanmoins le deviner à travers le bruit de la motorisation, différent de celui d'un véhicule conventionnel ;

[22] Même si le diesel électrique ne constitue pas un véhicule hybride, comme nous l'avons précisé en §2.5.1.1 p.27.

▷ les HYBRIDES FONCTIONNELS, possédant une ou plusieurs des fonctionnalités présentées en §2.3 (optimisation de la gestion des accessoires, start/stop, récupération au freinage, boost, mode tout électrique) et une ou plusieurs des trois premières fonctionnalités présentées en §2.4 (mode ZEV, recharge réseau, réseau embarqué de type domotique). Le conducteur ne peut donc ignorer qu'il est aux commandes d'un véhicule hybride.

Il semble que pour l'instant la vision marketing des constructeurs ne soit pas centrée sur les hybrides fonctionnels, principalement de par leur prix de vente élevé.

2.8 Quel est le meilleur hybride ?

Cette question vient naturellement à l'esprit quand on considère l'étendue des possibilités offertes par l'hybridation. Une tentative de réponse sera formulée en §10.1 p.103.

2.9 Essence ou diesel ?

Le moteur thermique du VHTE est l'élément le plus important du véhicule au regard des consommations et performances dynamiques, car c'est le transformateur principal de la chaîne de traction. Dans les mêmes conditions de fonctionnement (régime, couple), un moteur diesel consommera moins qu'un moteur à allumage commandé [MLK01]. Cela est dû au meilleur rendement intrinsèque du cycle thermodynamique diesel. En revanche, quand on considère les émissions de CO_2, la tendance peut éventuellement s'inverser, puisqu'un litre d'essence consommé produit environ 2,35 kg de CO_2, alors qu'un litre de gazole en produit environ 2,60 kg (ceci est principalement dû au fait que le gazole possède une masse volumique plus importante que l'essence).

Cependant, la motorisation diesel est connue pour être plus chère que son homologue à essence, principalement du fait des pressions élevées dans la chambre de combustion (qui imposent une conception plus robuste), et de l'injection directe qui est maintenant utilisée. Cette différence de prix ne pourra que s'accentuer dans les années à venir, pour les raisons suivantes [BDRT+04] :

▷ il faut respecter les normes d'émissions de HC, CO, et NO_x imposées par les normes Euro. Pour les véhicules diesel, le futur verra sans doute une réglementation plus sévère des émissions de particules et de NO_x, imposant l'utilisation de filtres appropriés ;

▷ à cyclindrée égale, le couple de démarrage du moteur thermique est bien plus élevé en technologie diesel. Ceci est à considérer lorsque la tendance est à un démarrage toujours plus rapide ;

▷ les problèmes vibratoires et acoustiques du diesel peuvent être problématiques. Ainsi, il semble que les constructeurs connaissent quelques difficultés pour respecter les normes Euro en ce qui concerne les niveaux d'émissions sonores.

On notera que pour l'instant, tous les véhicules hybrides commercialisés ont été réalisés par des constructeurs nippons, et sont équipés de moteur essence (Toyota Prius, Nissan Tino, Honda Insight et Civic, etc). Une raison à ce dernier point peut être le fait que la motorisation diesel est à ce jour très peu utilisée au Japon pour les véhicules particuliers.

2.10 Tendance des constructeurs

Deux alternatives s'offrent aux constructeurs quand il s'agit de dimensionner un véhicule hybride :

- ▷ soit obtenir de très bonnes performances dynamiques en ajoutant un moteur électrique relativement puissant à une chaîne de traction conventionnelle [Toy04, HEV04b, HEV04a] ;
- ▷ soit diminuer la taille du moteur thermique et utiliser un moteur électrique afin de baisser la consommation [PCLDvW01, MLK01]. Des ingénieurs de Volkswagen affirment que le surcoût dû à l'hybridation n'a de sens que si l'on utilise un moteur thermique de plus petite taille et de meilleur rendement (technologies innovantes, en particulier l'injection directe essence ou gazole). Cette thématique sera reprise dans le chapitre 3 p.43.

Il se trouve que dans la réalité, ces deux orientations semblant antagonistes n'établissent pas une frontière bien nette entre deux catégories de véhicule, car un véhicule rapide avec un moteur électrique puissant pourra bénéficier d'un déplacement des points de fonctionnement du moteur thermique vers ses meilleurs rendements, la consommation en étant améliorée. C'est ce que Toyota a constaté avec la version haute performance de la Prius 2004, la Prius GT [Toy04].

Dans la pratique, c'est la valeur du rapport puissance/masse embarquée du véhicule qui semble le meilleur moyen de connaître l'objectif premier du constructeur lors du dimensionnement. Ainsi un véhicule plus lourd, bien que pourvu d'une forte puissance de motorisation, se trouvera plutôt dans la seconde catégorie.

À titre d'exemple, citons la stratégie de Mitsubishi annoncée dans [HEV04b]. Sur le prototype « Concept-E », il s'agit d'obtenir des performances dynamique d'exception tout en gardant une consommation de carburant raisonnable. Les roues avant sont entraînées par un moteur essence V6 qui développe 200 kW. À l'arrière, Mitsubishi a installé un moteur électrique développant 150 kW. La batterie utilisée est constituée de 104 cellules lithium-ion pour une tension nominale totale de 400 V ; elle est placée dans le plancher afin de maintenir l'équilibre du véhicule. Mitsubishi annonce un coût additionnel de 10000$ à 15000$ pour la partie hybride proprement dite, à comparer à la partie de motorisation classique estimée à 25000$.

À l'opposé, il a fallu attendre la troisième génération du véhicule hybride Prius de Toyota pour que celui-ci puisse revendiquer le statut de véhicule hybride grand public rivalisant avec les véhicules traditionnels de même ordre de prix en ce qui concerne les performances et l'agrément de conduite [DRB04]. Toyota a d'ailleurs signé un accord avec Nissan concernant la licence d'utilisation du système à train épicycloïdal développé par la société Aisin. Ce partenariat devrait donner naissance en 2006 à la Nissan Altima Hybride, dont, semble-t-il, l'accent sera plutôt mis sur les performances dynamiques, comme pour le « Grand Sports Tourer », présenté par Mercedes-Benz en janvier 2004 au salon de Detroit. Le véhicule affiche en effet le 0-100km/h en 6.6 s, aidé en cela par un moteur électrique d'une puissance de 50 kW. Citons aussi parmi les véhicules présentés ou commercialisés très récemment :

- ▷ le Ford Escape Hybrid qui présente un moteur électrique de 70 kW ;
- ▷ le Toyota Highlander Hybrid et le Toyota SU-HV1, utilisant le même système que la Prius. Le premier annonce le 0-100km/h en moins de 8s. Le deuxième est équipé d'un moteur thermique et de deux moteurs électriques avant et arrière, de puissances respectives 150kW, 120kW et 50kW (la puissance de la génératrice n'est pas connue).

Notons que cette surenchère dans les puissances embarquées, même si elle s'avère être dans quelques années une réussite sur le plan marketing, peut laisser songeur. En effet, ceci ne va pas forcément dans le sens d'une amélioration de la sécurité routière (en tout cas ceci n'est pas le but affiché), et les réductions de CO_2 correspondantes seront quoi qu'il arrive moins importantes que si le but premier était la réduction de CO_2.

Selon le marché visé, certains constructeurs ou équipementiers s'engagent également dans le micro-hybride (e.g. Valeo avec PSA pour un véhicule start/stop annoncé pour fin 2004).

2.11 Exemples de véhicules hybrides

2.11.1 Véhicules commercialisés

Les caractéristiques des Honda Civic et Insight (architecture en figure 2.6 p.30), et de la Toyota Prius (figure 2.10 p.33) sont présentées en annexe D.

Citons quelques-unes des innovations et particularités présentes sur ces trois véhicules :

Insight [MV03]

- ▷ les NOx sont stockés dans un piège lors des phases de fonctionnement en mélange pauvre, c'est-à-dire lorsqu'ils sont difficiles à réduire. Cette réduction est réalisée plus tard, lors du passage temporaire à stoechiométrie ;
- ▷ le moteur fonctionne en mélange pauvre entre 1000 et 3000 tr/min et pmi<6-7 bars. À forte puissance, le moteur passe en fonctionnement à mélange riche. La transition entre mélange pauvre et mélange riche s'effectue avec un hystérésis ;

Les principales conditions qui inhibent l'arrêt du moteur thermique lors des phases d'arrêt du véhicule sont les suivantes[MV03] :

- ▷ transmission en marche arrière, en position N (point mort) ou S (mode sport) ;
- ▷ moteur thermique en montée de température ;
- ▷ batterie déchargée. Dans ce cas, le ralenti est maintenu avec un régime moteur plus élevé.

Le démarrage s'effectue si la pédale de frein est relachée.

Civic La Civic, postérieure à l'Insight, s'en inspire largement. En particulier, Honda a réutilisé le système alterno-démarreur intégré IMA (« Integrated Motor Assist »).

Prius

- ▷ variation de la synchronisation des soupapes afin de faciliter le démarrage ;
- ▷ Le moteur thermique utilise un cycle thermodynamique Atkinson-Miller, couplé à un système de commande variable des soupapes (VVT). Ce cycle permet de minimiser les pertes de pompage en travaillant avec un taux de détente supérieur au taux de compression. Le système repose notamment sur un pilotage des ouvertures et fermeture des soupapes d'admission afin d'optimiser la quantité d'air comprimé, en fonction de la charge. Ce type de moteur possède un bon rendement, mais la puissance développée au litre de cylindrée est limitée. Ceci est intéressant dans le cas du véhicule hybride, car le moteur électrique peut assister le moteur thermique lorsque la puissance ou le couple demandé à la roue est important.

2.11.2 Prototype de véhicule deux embrayages : Renault Ellypse

Le véhicule hybride résulte d'un concept ancien[23] ; un grand nombre de prototypes ont donc déjà été réalisés par les constructeurs (Golf Hybrid, Audi duo, General Motors Precept, Ford

[23] Selon [PCLDvW01], le premier hybride commercialisé fut un véhicule de type start/stop, dans les années 70.

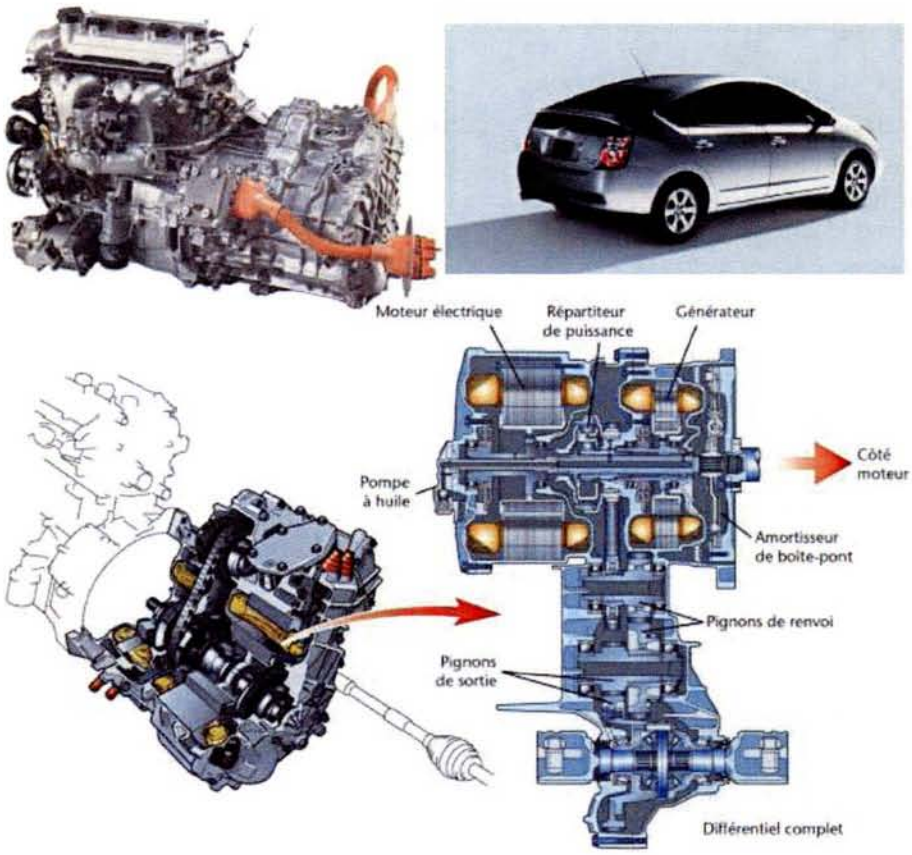


FIG. 2.12: *Toyota Prius : vue générale, bloc moteur, détail système THS*

FIG. 2.13: *Honda Civic : vue générale et bloc moteur*

Prodigy, Citroën Dynactive, etc.). Le Renault Ellypse (figure 2.14), présenté en 2002, revêt un intérêt particulier puisqu'il s'agit d'une architecture à deux embrayages (cf figure 2.9), c'est-à-dire l'architecture disponible sur le banc dynamique du LTE.

Il s'agit du premier véhicule hybride français conçu intégralement avec pour contrainte principale le respect de l'environnement. En effet, les prototypes précédemment proposés par les constructeurs français reposaient sur des plate-formes existantes, hormis le véhicule NEXT présenté en 1995 par Renault (mais dont l'architecture et la gestion d'énergie limitaient les économies de carburant possibles) [Dub02].

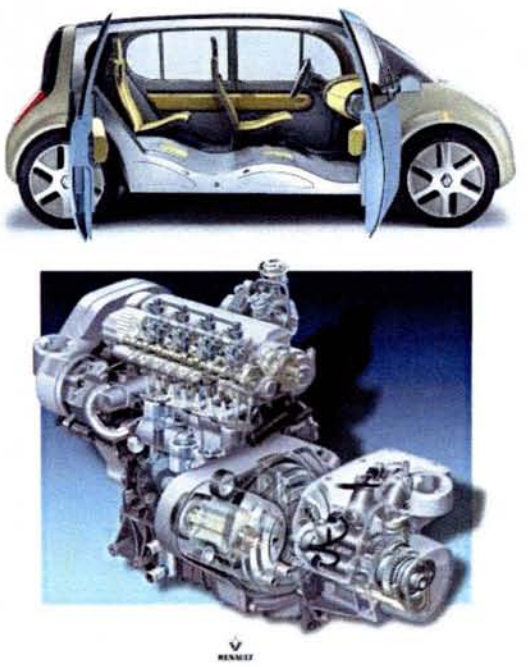


FIG. 2.14: *Renault Ellypse : vue générale et bloc moteur*

L'Ellypse se veut être une plate-forme technologique préfigurant ce que pourront être les berlines familiales d'ici 2010, avec un gros accent porté sur la facilité de démontage en vue du recyclage total du véhicule.

Elle comporte un moteur thermique 1.2l dCi développant 72 kW et 200 Nm au maximum. L'injection est directe, effectuée via des injecteurs piézo-électriques associés à un common rail où la pression atteint 2000 bars.

Les fonctions de start/stop, récupération au freinage et boost sont accomplies via un moteur électrique de 12kW. L'architecture électrique est de type 42V, beaucoup de fonctions traditionnellement hydrauliques étant électrifiées : climatisation, freinage. Le rendement global devient meilleur, et les problèmes écologiques de type fuites de fluides disparaissent.

Le post-traitement est assuré par un catalyseur 4 voies (CO, NOx, HC imbrûlés, particules).

La boîte de vitesse est robotisée ; le démarreur n'est pas conservé. Une gestion de l'énergie optimisée permet à Renault d'annoncer 85 g/km de CO_2 sur cycle NEDC, soit 3.2 l/100km de

gazole. Il faut néanmoins indiquer que cette très faible consommation est obtenue grâce à une synthèse globale sur le véhicule, et notamment une réduction importante de sa masse (réduction de 20% par rapport aux modèles du même segment).

Chapitre 3

Performances dynamiques et dimensionnement du véhicule hybride

La différence fondamentale entre le VHTE et le véhicule thermique classique est la présence de deux actionneurs participant à la motorisation[24], ce qui rend l'analyse des performances maximum plus délicate. De plus, le fait qu'un réservoir d'énergie de capacité limitée participe à la traction impose l'examen de cas particuliers, comme nous allons le constater plus bas.

3.1 Respect d'un cahier des charges pour un véhicule conventionnel

Avant la conception d'un véhicule, un cahier des charges est établi, avec en particulier des spécifications de performances à respecter. Citons à titre d'exemple les contraintes suivantes :

- ▷ temps pour atteindre la vitesse de 100 km/h départ arrêté sur route plate ;
- ▷ temps de reprise entre 80 et 120 km/h sur route plate ;
- ▷ vitesse minimum dans une côte à 5% sur autoroute. Celle-ci permet directement de définir la puissance maximum du moteur thermique.

3.2 Dimensionnement d'un VHTE avec ou sans downsizing

Dans un VHTE, la possibilité de coupler les deux machines pour assurer la traction permet d'augmenter les performances par rapport à celles du moteur thermique seul. Lors de la conception du VHTE, le but est de dimensionner les organes moteur (moteurs thermique et électrique) de manière à respecter un cahier des charges donné. Deux démarches sont possibles :

1. partir d'un véhicule thermique conventionnel existant respectant ce cahier des charges, et transformer ce dernier en modifiant plus ou moins profondément sa chaîne de traction, en particulier en ajoutant un moteur électrique (hybridation du véhicule conventionnel de référence) ;

[24] Si l'on considère la première des deux définitions présentées dans2.1.

2. concevoir le véhicule hybride sur une plate-forme développée spécifiquement, avec pour objectif premier de respecter le cahier des charges fixé.

Parce qu'elle permet d'utiliser des caractérisations de composants existants, nous nous placerons dans le cadre de la première démarche. Celle-ci se subdivise en deux nouvelles possibilités :

- ▷ diminuer la taille du moteur thermique, notamment sa cylindrée, en limitant la courbe de couple et la puissance maximum. Ceci correspond à effectuer ce qu'on nomme « DOWNSIZING DU MOTEUR THERMIQUE ». Citons comme exemples de VHTE conçus avec un downsizing du moteur thermique l'Insight (diminution de la puissance du moteur thermique de 55 à 49kW) et le prototype Valeo i-MoGen (81 à 74kW)[PCLDvW01] ;
- ▷ conserver le moteur thermique d'origine, mais ne jamais l'utiliser à pleine puissance en même temps que le moteur électrique (si c'était le cas, les performances du véhicule hybride obtenu outrepasseraient celles préconisées dans le cahier des charges). Ceci permet d'utiliser le moteur thermique dans des zones de charge favorables à la consommation et aux émissions (e.g. Honda Accord V6 Hybride). Cependant, le véhicule ne bénéficie pas du gain de poids dû au downsizing du moteur thermique. Cela implique un moteur électrique plus puissant, et une batterie en conséquence : le véhicule est plus lourd, ce qui ne va pas dans le sens d'une réduction de la consommation ;
- ▷ conserver le moteur thermique d'origine, et l'utiliser sans aucun bridage. L'hybridation peut alors être vue comme un gain de puissance qui permettra d'augmenter les performances ou l'agrément de conduite du véhicule conventionnel de référence. Cette possibilité a déjà été évoquée en §2.10.

Finalement, il apparaît que le constructeur devra trouver un compromis entre ces trois possibilités, éventuellement en recherchant un optimum vis-à-vis d'un critère donné (e.g. consommation ou performance).

3.3 Existence et apparition d'un mode dégradé

Un véhicule hybride possède au moins deux sources d'énergie : lorsqu'une des deux est épuisée, il n'est évidemment plus possible de l'utiliser. Dans ce cas, le transformateur associé à la source épuisée ne pourra plus être utilisé (du moins en fonctionnement moteur si l'on prend en compte des considérations de réversibilité, ce qui n'est pas nécessaire à ce stade). Dans le cas d'un VHTE, cette situation peut survenir lorsque la batterie a atteint un état de charge trop faible : la machine électrique ne peut plus être utilisée qu'en générateur. Cela rend impossible la fonction « boost », la diminution des performances en accélération pouvant alors être ressentie par le conducteur. Nous nommerons cette situation MODE DÉGRADÉ.

Le mode dégradé peut ne jamais survenir si les conditions d'utilisation du véhicule sont telles que la batterie n'est pas trop sollicitée en décharge. Un conducteur ménageant son véhicule pourrait donc fort bien ne jamais ressentir la baisse de performances résultant du mode dégradé. Néanmoins, certaines situations sont telles qu'il devrait subvenir obligatoirement (APPARITION du mode dégradé) :

- ▷ conduite en montagne ;
- ▷ montée longue sur autoroute ;
- ▷ succession d'accélérations pieds au plancher ;
- ▷ tractage de charge importante (caravane, remorque, etc.).

Ainsi, sur la première version de la Toyota Prius, nous avons remarqué qu'un mode dégradé apparaissait après quelques accélérations maximum 0-100 km/h, successives et sans récupération au freinage (décélération libre). Ce temps d'accélération augmentait alors de 15s à 19s [JH99].

Il est cependant important de remarquer que le mode dégradé peut ne jamais survenir si la puissance utilisée lors des accélérations maximum n'est jamais supérieure à la puissance maximum du moteur thermique. Cela équivaut à dire que dans une telle configuration le mode dégradé n'EXISTE pas. On est donc naturellement amené à distinguer existence et apparition du mode dégradé. Un moyen de s'assurer de la non-existence du mode dégradé consisterait par exemple :

1. à utiliser le moteur thermique et le moteur électrique de manière à ce que la puissance totale instantanée ne dépasse pas la puissance maximum du moteur thermique ;
2. lorsque la batterie est trop déchargée à cause d'une utilisation intensive du moteur électrique, à rétrograder afin de faire fonctionner le moteur thermique à des régimes proches de sa puissance maximum. Ceci sera aisé avec une CVT qui permet de choisir précisément le rapport de réduction, alors que dans le cas d'une boîte discrète, il faudra prendre le rapport donnant la vitesse de rotation maximisant la puissance sur le moteur thermique.

La première solution équivaut à interdire l'utilisation de l'ensemble moteur électrique et moteur thermique à une puissance totale supérieure à la puissance maximale du moteur thermique. Sur la figure 3.1, on a représenté la zone d'utilisation correspondante, à partir des courbes de puissance maximum moteur thermique et moteur électrique (ici le rapport de courroie est tel que les deux machines atteignent leur régime maximum simultanément).

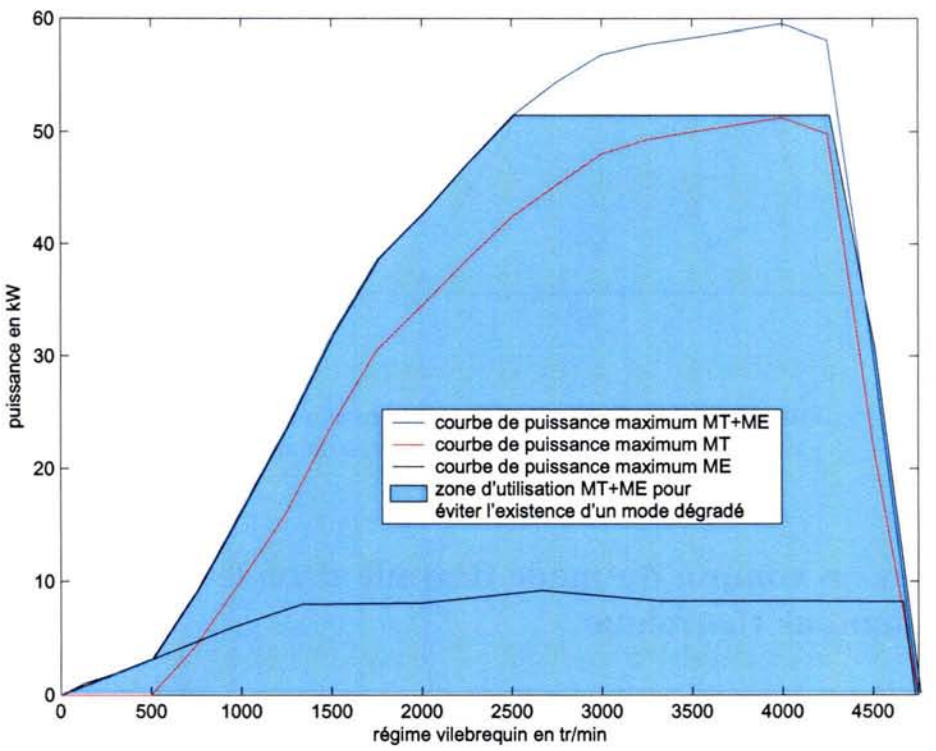


FIG. 3.1: *Zone d'utilisation de l'ensemble moteur thermique/moteur électrique permettant d'éviter l'existence du mode dégradé*

Cependant, se priver de la possibilité d'utiliser les moteurs thermique et électrique à pleine puissance en même temps n'apparaît pas comme une solution optimale vis-à-vis du critère de coût du véhicule. C'est pourquoi il est intéressant que les courbes de puissance maximum des deux machines agissent sur des plages de régime différentes.

Avec les considérations précédentes concernant la non-existence du mode dégradé, il paraît judicieux de disposer de la puissance maximum du moteur électrique dès les faibles régimes d'utilisation du moteur thermique (entre 1000 et 2000 tr/min), puisque vers le régime correspondant à la puissance maximum du moteur thermique (généralement 4000 tr/min ou plus), le moteur électrique ne doit pas être utilisé. Or, les moteurs électriques peuvent atteindre leur puissance maximum généralement entre 1000 tr/min et 2000 tr/min, dès que thermiquement parlant de forts rapports cycliques d'onduleur sont possibles. Ceux-ci sont donc tout à fait adaptés à cet usage, d'autant plus qu'un éventuel rapport de courroie accentue cette caractéristique : généralement la puissance maximum du moteur électrique pourra être atteinte dès 500 à 1000 tr/min mesurés au vilebrequin. L'allure correspondante des courbes de puissance maximum des moteurs électrique et thermique est représentée sur la figure 3.2.

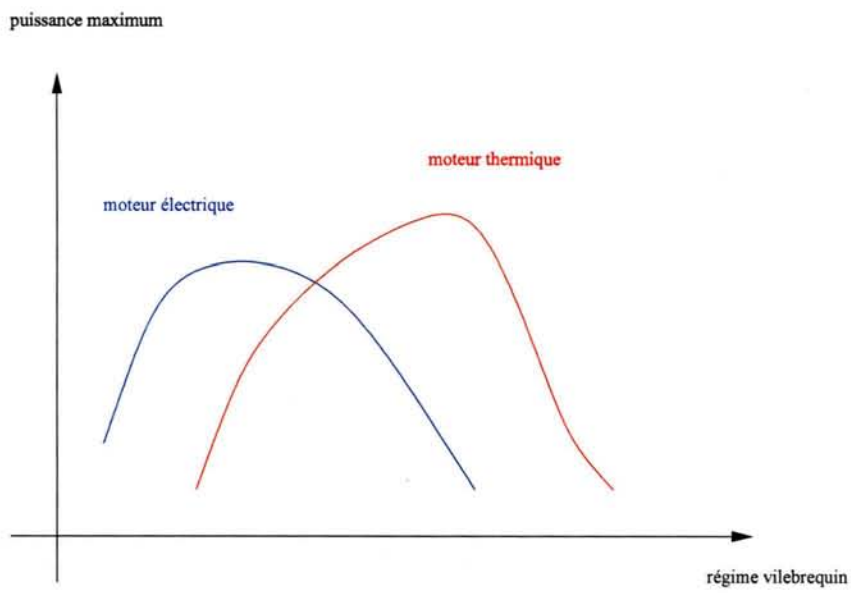


FIG. 3.2: *Allure des courbes de puissance moteur électrique et thermique dans le cas de la non-existence du mode dégradé*

3.4 Prise en compte du mode dégradé dans le dimensionnement du moteur thermique

En dehors des considérations qualitatives précédentes, il paraît important de considérer une contrainte de puissance minimum du moteur thermique lors du dimensionnement. Celle-ci est généralement fixée à partir du respect d'une contrainte de vitesse minimum en côte sur autoroute, comme on l'a évoqué en §3.1 p.43. Ceci prend son sens quel que soit le mode du dimensionnement du VHTE :

- ▷ s'il y a existence du mode dégradé, on a vu que précisément dans les conditions de pente sur autoroute, le mode dégradé était inévitable ;
- ▷ s'il n'y a pas existence du mode dégradé, la puissance maximum que peut délivrer la chaîne de traction est de toute façon égale à la puissance du moteur thermique, en particulier sur autoroute.

Cette contrainte peut être fixée de multiple manière. Par exemple :

- ▷ le programme PNGV [ADF00] propose une vitesse minimale de 88 km/h sur une pente de 6.5% ;
- ▷ Toyota [ATS99] préconise 105 km/h sur une côte de 5% ;
- ▷ Volkswagen indique une puissance de 55 kW minimum [MLK01], pour les caractéristiques physiques d'une Jetta.

La contrainte employée pour l'étude PARAVH réalisée à l'INRETS est 110 km/h sur une pente de 5% [DRST+04] (voir §10.1 p.103).

3.5 Cahier des charges d'un véhicule hybride

D'après ce qui précède, il est clair que la contrainte de puissance minimale du moteur thermique doit être prise en compte lors de la conception d'un véhicule hybride. Pour dimensionner le moteur électrique et la batterie du véhicule hybride, on peut retenir des critères d'agrément de conduite, comme le temps d'accélération 0-100 km/h.

Il est cependant possible d'affiner le dimensionnement du véhicule en ajoutant des contraintes supplémentaires (e.g. pourcentage de pente maximum pour le décollage en tout électrique). Ainsi G. Paganelli présente dans [Pag99] l'ensemble des contraintes qui furent à respecter lors de la conception d'un prototype de véhicule hybride réalisé au LAMIH en collaboration avec PSA.

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11
54601 VILLERS-LES-NANCY Cédex

Chapitre 4

Position du problème

Nous définissons dans ce chapitre la problématique du dimensionnement et de la commande des véhicules hybrides.

Nous décrirons la procédure systématique élaborée pendant le travail de thèse.

Nous renvoyons à l'annexe E p.179 les lecteurs n'étant pas familiers au concept de mesure de consommation par suivi de vitesse sur banc à rouleau. Par ailleurs, un rappel d'automatique[25] a été placé en annexe F p.181, afin de définir certains termes employés.

4.1 Commande d'un véhicule hybride

4.1.1 Loi de gestion de l'énergie à bord d'un VHTE

Dans un véhicule conventionnel, l'enfoncement de la pédale d'accélération correspond directement à une demande d'injection, donc à un couple fourni par le moteur thermique. De manière intuitive, le conducteur régule la vitesse du véhicule en enfonçant ou relâchant la pédale d'accélération.

Dans le cas d'un véhicule hybride, le processus est plus complexe, du fait de la présence d'un deuxième convertisseur électromécanique participant à la traction : la commande du conducteur au niveau de la pédale d'accélération peut être répartie entre le moteur thermique et le moteur électrique. Dans ce contexte, on peut imaginer que l'enfoncement de la pédale d'accélération traduise d'autres grandeurs de commande, par exemple :

- ▷ la somme des puissances aux roues ;
- ▷ la somme des couples aux roues ;
- ▷ la somme des couples sur les machines électrique et thermique. Celle-ci est différente de la somme des couples aux roues, du fait des rendements, mais surtout parce qu'une boîte de vitesse classique entraîne des ruptures de couple au niveau des roues lors des changements de rapport.

Dans tous les cas, plus d'enfoncement au niveau de la pédale d'accélération correspondra à plus d'accélération pour le véhicule. Il est difficile d'imaginer quelle est la solution la plus intéressante du point de vue du confort de conduite, sans réalisation d'un prototype et essai par un conducteur réel.

[25] Inspiré de [Cul94] et [BDTR+90].

Dans la suite de ce mémoire, nous considérerons que la pédale d'accélération commande la somme des couples aux roues, ce qui devrait permettre au conducteur d'un VHTE de retrouver les mêmes sensations que sur un véhicule conventionnel. Ceci étant décidé, le problème est de trouver comment répartir cette demande du conducteur entre les deux sources d'énergie, un problème dont la résolution ne doit bien entendu pas revenir au conducteur. Ceci doit être réalisé de manière transparente par un calculateur embarqué, qui va donc établir à tout instant ce qu'on nomme une « STRATÉGIE DE GESTION », ou « LOI DE GESTION DE L'ÉNERGIE » de la chaîne de traction hybride.

4.1.2 Charge sustaining ou charge depleting, mesure de la consommation de carburant à bilan batterie nul et loi de gestion d'énergie

La loi de gestion d'énergie peut utiliser plus ou moins le moteur électrique en traction, ce qui reviendra à plus ou moins décharger la batterie. Deux possibilités sont donc offertes :

- ▷ laisser l'état de charge dériver au fil du temps, plutôt dans le sens de la décharge (néanmoins entre les limites d'état de charge préconisées par le constructeur). Ce mode de fonctionnement est connu sous le nom de « CHARGE DEPLETING ». Ceci entraîne, à un moment ou un autre, la nécessité de recharger la batterie grâce au réseau électrique ;
- ▷ contrôler l'état de charge de manière à ne jamais avoir à recharger la batterie via le réseau électrique. Ce mode de fonctionnement est connu sous le nom de « CHARGE SUSTAINING ». L'état de charge est donc flottant autour d'une valeur dans la plage préconisée par le constructeur.

En charge depleting, deux énergies différentes sont consommées par le véhicule (carburant, et électricité via le réseau électrique). C'est pourquoi généralement deux valeurs sont indiquées : la consommation de carburant pour une décharge de la batterie donnée, et le nombre de kWh du réseau électrique nécessaires pour revenir à l'état de charge initial. Si l'on veut agréger ces deux valeurs en une seule indiquant la consommation globale du véhicule (classiquement le nombre de grammes de CO_2 par km), il est nécessaire d'évaluer l'émission en g de CO_2 par kWh correspondant au mix de la production électrique nationale. Ce chiffre est difficile à déterminer précisément ; de plus il variera suivant le pays de production. En France, où près de 80% de l'énergie électrique est issue du combustible nucléaire, ce chiffre sera faible ; mais en toute rigueur on ne peut ignorer les déchets radioactifs correspondant à la recharge de la batterie.

En charge sustaining, il devient possible d'annoncer la consommation de carburant à iso-état de charge[26] (état de charge en début de cycle égal à l'état de charge en fin de cycle). Deux méthodes sont possibles [MSIS01, Dub02], la répétition du cycle, et l'approximation linéaire :

- ▷ lorsque les lois le gestion d'énergie sont élaborées de manière à maintenir l'état de charge de la batterie dans les limites fixées par le constructeur, on peut observer asymptotiquement et dans certaines conditions un comportement périodique de cet état de charge sur une répétition d'un même cycle (voir §11.3 p.121). Ceci permet d'estimer une consommation moyenne à iso-état de charge. Le nombre de cycles à effectuer avant l'iso-état de charge n'est pas connu à l'avance, et peut varier suivant la stratégie, le cycle, et l'état de charge initial. De plus, on notera que par nature cette méthode est très difficile à adapter aux cycles réalisés départ froid ;
- ▷ la méthode de l'approximation linéaire consiste à tracer la consommation de carburant du véhicule en fonction de la variation d'état de charge de la batterie sur le cycle, pour divers états de charge initiaux. Par approximation linéaire, on peut évaluer la consommation correspondant à l'iso-état de charge.

[26] Ou encore, « à bilan batterie nul ».

Notons que lorsqu'on travaille en simulation, la reproductibilité des essais permet de remplacer avantageusement l'approximation linéaire par une dichotomie.

Dans ce mémoire, nous nous sommes attachés principalement au problème du charge sustaining, mais la démarche que nous avons employée pourrait aussi être utilisée dans une optique de charge depleting.

Néanmoins, il semble qu'à l'heure actuelle, pour les véhicules particuliers, le charge sustaining soit plus en accord avec la vision marketing des constructeurs : le véhicule hybride doit être discret, et non fonctionnel (voir §2.7). Ceci provient surtout du fait que dans les hybrides fonctionnels, la batterie doit être de plus forte capacité et/ou puissance, ce qui entraîne un surcoût substantiel.

La consommation de carburant du VHTE en charge sustaining peut être mesurée à partir du moment où un certain nombre de paramètres sont fixés (figure 4.1) :

- ▷ l'architecture du VHTE ;
- ▷ le dimensionnement du VHTE, c'est-à-dire l'ensemble des caractéristiques du véhicule : masse, $S \cdot C_x$, couples et puissances maximum des moteurs électriques et thermiques, boîte de vitesse, etc. ;
- ▷ la stratégie de gestion de la chaîne de traction ;
- ▷ le cycle de conduite vitesse-temps ;
- ▷ la puissance des accessoires ;
- ▷ les conditions initiales de température et d'état de charge. Nous reviendrons sur ce point dans la partie III p.113.

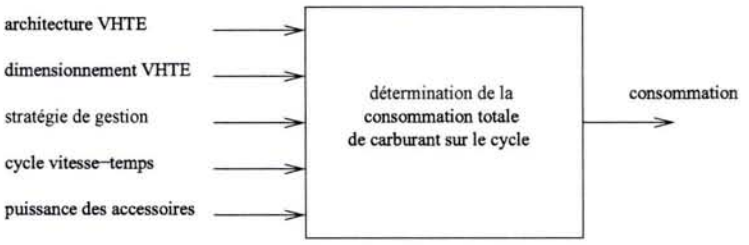


FIG. 4.1: *Détermination de la consommation sur un cycle*

4.2 Méthodologie proposée, placement par rapport à l'état de l'art

Il est possible de faire varier les cinq paramètres d'entrée présentés sur la figure 4.1 indépendamment. Choisir un cycle vitesse-temps et une puissance d'accessoires ne pose pas de problème particulier. En revanche, lorsqu'il s'agit de définir une stratégie de gestion et un dimensionnement du VHTE pertinents d'un point de vue consommation de carburant, les choses sont moins évidentes.

4.2.1 Choix de la stratégie de gestion indépendamment des autres paramètres

Si l'on suppose le dimensionnement fixé, ainsi que le cycle de conduite et la puissance des accessoires, le travail de l'ingénieur va être d'élaborer une loi de gestion de la chaîne de traction. Celle-ci est primordiale dans le sens qu'elle va :

1. Permettre de fonctionner en mode charge sustaining (ou pas), sur le cycle et pour le dimensionnement donnés. Plus généralement, réaliser une différence d'état de charge donnée entre le début et la fin du cycle de conduite ;
2. donner une consommation plus ou moins importante, sur le cycle, pour le dimensionnement et la puissance des accessoires donnés ;
3. donner un agrément de conduite plus ou moins satisfaisant.

Si l'on recherche un problème d'optimisation dans la problématique précédente concernant l'élaboration de la loi de gestion d'énergie, il semble que le premier point puisse être pris comme contrainte, tandis que les deux suivants comme critères. Pour l'instant, attachons-nous à la consommation de carburant, l'aspect confort n'étant pas pris en compte dans un premier temps. On peut se poser le problème de minimiser la consommation de carburant du véhicule, pour un dimensionnement et sur un cycle vitesse-temps donnés.

Il est clair que le minimum absolu de la consommation de carburant ne peut se faire qu'en connaissant le cycle de vitesse a priori. En effet, plaçons nous dans une situation de conduite réelle. Si le parcours réalisé est tel qu'une forte descente[27] se présentera au conducteur dans 5 km, l'énergie récupérée au freinage à ce moment-là doit permettre d'utiliser la batterie en décharge dès maintenant, et donc de moins solliciter le moteur thermique, c'est-à-dire finalement baisser sa consommation. En fait, la connaissance du parcours a priori n'est pas possible dans la réalité, puisque le calculateur du véhicule ne peut connaître les intentions futures du conducteur[28]. C'est pourquoi la démarche de minimisation de la consommation de carburant avec connaissance du cycle a priori n'est possible qu'HORS LIGNE. Ce problème d'optimisation est nommé dans la littérature « OPTIMISATION GLOBALE », au sens que le minimum de consommation fourni est un minimum absolu prenant en compte un maximum de paramètres, y compris certains qu'il ne sera pas possible de connaître dans la réalité. Cette démarche hors ligne est cependant très intéressante, pour deux raisons [Pag99] :

- ▷ elle nous permet d'obtenir une indication sur la consommation minimum qu'il nous sera possible d'obtenir sans connaissance du parcours a priori, c'est-à-dire EN LIGNE[29]. Il sera donc possible de juger de la qualité d'une stratégie en ligne en comparant la consommation obtenue à celle donnée par l'optimisation globale. Néanmoins, comme nous le verrons plus loin, le problème d'optimisation globale ne peut être résolu que dans le cadre d'une modélisation simplifiée du véhicule, en particulier ne prenant pas en compte les transitoires des moteurs, et les temps de changements de rapport. Il faudra donc en tenir compte lors de la comparaison ;
- ▷ elle nous offre la possibilité d'extraire des règles à partir des résultats de l'optimisation, qui pourront servir de base à l'élaboration de stratégie en ligne. Cet aspect sera traité dans la partie III p.113.

[27] En fait, les cycles passés sur banc ne prennent pas en compte le dénivelé du parcours. Mais cela n'enlève rien à la validité de l'argument présenté.

[28] Certaines démarches peuvent néanmoins être tentées, telles la détection d'un parcours répété tous les jours, ou bien une estimation des possibilités futures grâce à un système de type GPS.

[29] C'est-à-dire en temps réel.

Certains auteurs se sont attachés au problème de l'optimisation globale, pour une architecture et un dimensionnement de véhicule hybride particulier, parmi ceux-ci, citons : [Bou02, ZCC03, Del02, Ven01, Dub02]. Nous examinerons de plus près ces travaux en chapitre 7 p.77.

4.2.2 Choix du dimensionnement indépendamment des autres paramètres

Une stratégie étant fixée, ainsi que le cycle de conduite et la puissance des accessoires, on peut se poser le problème de choisir le dimensionnement du véhicule qui optimise un critère donné, par exemple la consommation de carburant où les performances en accélération, avec un certain nombre de contraintes. Si l'on choisit de minimiser la consommation de carburant, il est important que les dimensionnements soient tels que tous les véhicules aient les mêmes performances dynamiques.

Assez peu d'auteurs ont abordé cet aspect du problème, probablement de par la complexité informatique que cela peut requérir. Citons :

- ▷ [ADF00]. Les auteurs fixent une architecture de véhicule hybride donnée. Pour modéliser le véhicule, les auteurs utilisent le logiciel ADVISOR, réalisé par le NREL. Des cartographies de moteur thermique sont générées par un programme de simulation d'un moteur thermique diesel turbocompressé, en régime quasi-permanent. Plusieurs dimensionnements de moteur thermique, électrique et batterie sont choisis, chacun amenant par procédé itératif à des minima locaux par rapport au critère consommation de carburant. La stratégie de gestion est celle adoptée par ADVISOR. Parmi tous les minima locaux le minimum est retenu, celui-ci étant supposé global.
- ▷ [VdT00]. Les auteurs utilisent ADVISOR afin de fournir des consommations pour les architectures hybrides parallèle et série. Chaque architecture dispose de sa propre stratégie, ce qui introduit une incertitude dans les comparaisons. Quatre classes de véhicule correspondant à quatre cahiers des charges de performances sont fixés.
- ▷ [FFB00a]. L'architecture envisagée est le VHTE parallèle. Les auteurs ne traitent pas le problème du respect d'un cahier des charges de performances, et se basent sur des considérations énergétiques simples pour dresser une étude paramétrique concernant l'influence du couple de la machine électrique sur les gains en consommations. La stratégie considérée consiste à réaliser avec le moteur électrique soit du boost, soit de la récupération au freinage.

Le point commun à ces travaux est que la loi de gestion de l'énergie employée à bord des véhicules considérés est définie a priori. À cette démarche, il est possible d'objecter que :

- ▷ d'une part, cette stratégie donnée n'est pas forcément idéale pour le véhicule hybride considéré ;
- ▷ d'autre part, cette stratégie peut se révéler plus ou moins pertinente d'un dimensionnement à un autre, suivant le taux d'hybridation parallèle par exemple.

4.2.3 Originalité de la démarche proposée : de la comparaison des véhicules jusqu'à la génération de lois en ligne implémentables en temps réel

4.2.3.1 Optimisation globale hors ligne : détermination systématique du potentiel d'une architecture

À notre connaissance, il n'existe pas de travaux réunissant les deux démarches présentées en §4.2.1 et §4.2.2, c'est-à-dire proposant un moyen d'évaluer le potentiel réel d'une architecture

(grâce à un logiciel d'optimisation globale), et réalisant une étude de sensibilité par rapport au critère consommation de carburant pour une variation de l'architecture et du dimensionnement du véhicule.

Nous proposons ici un outil d'optimisation globale, nommé KOALA[30], qui réalise une optimisation globale pour une architecture, un dimensionnement, une puissance des accessoires, et un cycle de conduite vitesse-temps donnés. Celui-ci détermine de manière *systématique* la loi de gestion adaptée au véhicule considéré, minimisant sa consommation de carburant pour une variation d'état de charge batterie donnée, enlevant ainsi le caractère arbitraire du choix de la stratégie de gestion.

Les consommations obtenues par KOALA représentent le potentiel de chaque architecture. Si les dimensionnements sont effectués de manière à ce que tous les véhicules disposent des mêmes performances dynamiques, on obtient un moyen objectif de comparer des véhicules entre eux, par rapport au critère consommation de carburant. Ceci a fait l'objet d'une étude paramétrique systématique, détaillée dans le chapitre 10 p.103.

4.2.3.2 Génération systématique de lois de gestion en ligne

La démarche d'élaboration systématique de stratégies par optimisation globale n'est néanmoins applicable qu'hors ligne, avec une connaissance préalable du cycle de conduite utilisé.

Pour commander un véhicule en temps réel, il est nécessaire d'élaborer des lois en ligne, utilisables sans la connaissance a priori du parcours. Nous examinerons en chapitre 11 p.115 quelques méthodes utilisées dans la littérature. Comme nous le verrons, ces méthodes sont soit empiriques, soit résultant de méthodes plus fines, par exemple de l'étude des flux énergétiques dans la transmission du véhicule :

- ▷ les lois empiriques sont difficiles à justifier, et souvent largement discutables ;
- ▷ les lois résultant de considérations plus fines recèlent souvent un certain nombre de paramètres de réglage, celui-ci s'effectuant de manière empirique, par tâtonnements. De plus, ce réglage doit être recommencé pour chaque nouveau véhicule considéré.

Nous proposons une démarche *systématique* d'élaboration de lois de gestion d'énergie applicables en ligne, quels que soient l'architecture, le dimensionnement, et la puissance des accessoires.

Celle-ci sera détaillée en chapitre 12 p.131.

[30]KOALA est un outil en ligne de commande, programmé en C. Un bon nombre de paramètres du véhicule sont réglables par des options en ligne de commande, ce qui permet de faciliter son exécution systématique dans un environnement de type UNIX. Une autre partie des paramètres qu'il requiert (caractéristiques moteurs, etc.) est placée dans un fichier au format Matlab/Octave, appelé en ligne de commande également. KOALA peut écrire des fichiers de résultats au format Matlab/Octave.

Deuxième partie

Outil d'optimisation globale KOALA

Chapitre 5

Modélisation du véhicule dans KOALA

5.1 Distinction forward/backward et finesse de modélisation

L'évaluation d'une architecture hybride, d'un dimensionnement de véhicule et de sa gestion énergétique nécessite de déterminer sa consommation de carburant, comme nous l'avons vu précédemment en §4.1.2. Ceci ne peut se faire que difficilement en conditions réelles, car d'une part cela nécessite de réaliser un prototype et de changer ses composants pour chaque étude paramétrique, et d'autre part parce que divers paramètres non commandables pourraient nuire à la reproductibilité de l'essai, même sur un banc à rouleau. Ces deux difficultés n'existent pas en simulation, c'est pourquoi un grand nombre de logiciels ont été développés ces dernières années, principalement suite aux engagements des constructeurs concernant les émissions de CO_2.

Ces logiciels se classent en deux catégories :

- ▷ BACKWARD (« en arrière ») (ADVISOR, SIMULCO). Le point de départ est le cycle vitesse-temps : la vitesse à la roue étant connue, il est possible de calculer le couple à lui fournir, en tenant compte de la masse du véhicule, des forces de résistance à l'avancement (gravité, roulement, et aérodynamique), et de l'inertie des parties tournantes du véhicule. La démarche consiste à remonter la chaîne de traction en calculant à partir de ce couple les valeurs des variables endogènes qui nous intéressent. Par exemple, pour un véhicule conventionnel, cela pourrait être le couple de freinage mécanique, le rapport de boîte, l'état de l'embrayage (fermé, ouvert, ou glissant), le couple moteur thermique, le régime moteur thermique, etc.
- ▷ FORWARD (« en avant ») (VEHLIB, PSAT). La vitesse à la roue n'est pas, contrairement au backward, le point de départ pour le calcul des valeurs des variables endogènes, mais représente une consigne de vitesse qu'une modélisation de conducteur va tenter de respecter au plus juste[31]. La variable de commande est généralement l'enfoncement de la pédale d'accélération.

La modélisation backward ne respecte pas la causalité de la situation réelle, où le conducteur essaie de respecter une certaine vitesse, la commande étant la pédale d'accélérateur (par exemple en ville, la consigne est de 50 km/h). Schématiquement, les machines thermique et électrique fournissent un couple, la route et l'inertie du véhicule ainsi que de ses parties tournantes constituent le couple résistant. La modélisation forward est donc plus représentative de la réalité. Ceci lui donne l'avantage de ne nécessiter que peu d'adaptations pour une application en temps réel. Ainsi, à l'outil VEHLIB développé au LTE pour la simulation de véhicule, correspond une version temps réel utilisée sur banc dynamique, nommée VEHIL[JTM+04].

[31] Généralement le conducteur est modélisé par un simple régulateur de type proportionnel-intégral (PI).

Notons que de manière générale, le processus de régulation de la vitesse du véhicule par rapport à un profil de consigne peut entraîner des effets de pompage. Ceux-ci n'apparaîtraient pas pour un usage réel sur prototype, qui, s'il n'est pas exactement en boucle ouverte, est tout de même dans ce cas moins contraint.

Dégageons les différentes variables endogènes et exogènes pour le système véhicule dans le cas des modélisations backward et forward. Le cycle vitesse-temps, connu par avance, peut être considéré comme une variable exogène, mais sur laquelle on ne peut agir. Ce n'est donc pas une variable de commande, il se situe dans la catégorie « autres variables exogènes » présentée en annexe F p.181.

- ▷ dans le cas forward, la vitesse du véhicule peut être prise comme variable d'état mesurée. On régule celle-ci par rapport à la vitesse de consigne du cycle de roulage. Il s'agit donc d'une commande en boucle fermée. En résumé, nous avons représenté sur la figure 5.1 le système véhicule conventionnel dans le cas de la modélisation forward.
- ▷ dans le cas backward, la vitesse du véhicule est respectée à chaque instant, via des relations de type contrainte égalité. Il ne semble donc pas souhaitable d'assimiler celle-ci à une variable d'état.

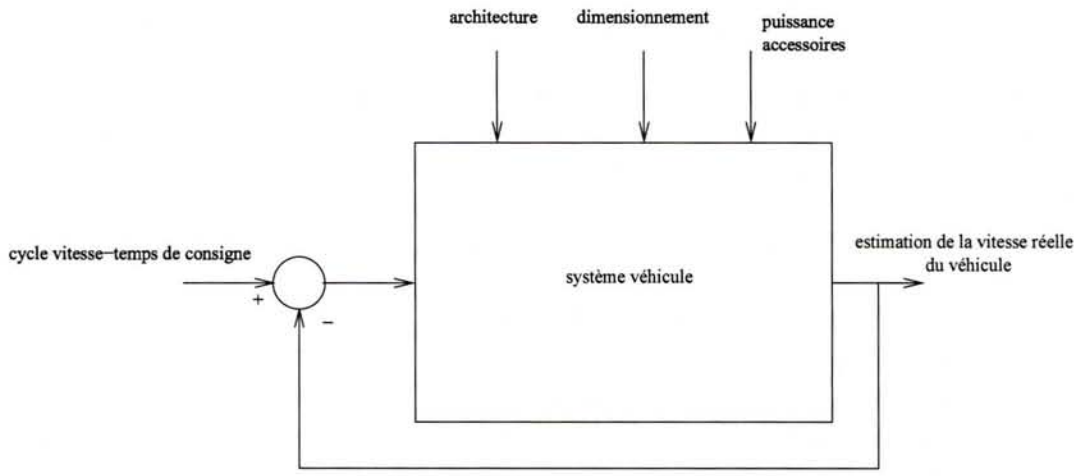


FIG. 5.1: *Système véhicule conventionnel en modélisation forward*

Dans une problématique de type véhicule hybride, et avec les considérations évoquées en §4.1.2 p.50 concernant le « charge sustaining », l'état de charge instantané de la batterie peut constituer une variable d'état à commander. Le but sera donc, pour une architecture, un dimensionnement, une demande d'accessoires, et un cycle de vitesse donné, de déterminer les commandes permettant d'atteindre un état de charge B en partant d'un état de charge A.

Pour résumer, on trouvera une variable d'état dans le cas backward (l'état de charge instantané de la batterie), et deux dans le cas forward (vitesse véhicule et état de charge instantané de la batterie).

Notons que dans le cas backward, la contrainte de respect strict de la vitesse de consigne peut se révéler impossible à satisfaire par la chaîne de traction, dans le cas de fortes accélérations. De manière générale dans les logiciels de type backward, un bon nombre d'effets de bords sont à traiter .

Le logiciel d'optimisation globale KOALA que nous présenterons en chapitre 8 p.85 est de type backward par nécessité. En effet, les méthodes d'optimisation globale dont nous ferons une description en chapitre 7 p.77 ont besoin de la connaissance précise de la vitesse instantanée réalisée à la roue[32]. Si l'on se place dans le cas forward, la vitesse n'est connue qu'à la précision de la régulation en vitesse prêt.

Nous allons décrire dans la suite de ce chapitre (§5.3) les modélisations adoptées pour chacun des composants du VHTE dans le logiciel backward d'optimisation globale KOALA. Notons qu'elles ne prennent pas en compte d'aspect dynamique. En effet, il s'agit de respecter les restrictions précédemment évoquées concernant la spécificité des outils backward.

Dans la mesure du possible, nous tentons de garder l'ordre qui était celui adopté dans le chapitre 1 p.3, lorsque nous avons abordé la description générale des composants utilisés dans les véhicules hybrides.

5.2 Détermination du couple à la roue Γ_R à partir de la vitesse à la roue Ω_R

À partir de maintenant, nous utilisons les notations énumérées en début d'ouvrage.

Pour calculer le couple à appliquer à la roue afin d'obtenir une accélération donnée, il est nécessaire de tenir compte :

- ▷ d'une part, de l'inertie du véhicule, et de celle des parties tournantes de la chaîne de transmission. À faible vitesse à la roue, ces dernières peuvent ne plus être négligeables par rapport à l'inertie du véhicule.
- ▷ d'autre part, des forces de résistance à l'avancement (forces aérodynamique, de roulement, et de gravité).

Le couple à la roue est calculé grâce à l'outil de simulation VEHLIB [TJB04]. Néanmoins, le problème est qu'on ne peut pas connaître l'inertie des parties tournantes sans connaître le rapport de boîte courant. Or, le rapport de boîte optimisé par KOALA n'est pas connu à l'avance. C'est pourquoi une inertie moyenne est prise en compte lors du calcul de Γ_R à partir de Ω_R (cf annexe J p.191)[33].

5.3 Modélisation des composants du véhicule dans KOALA

5.3.1 Batterie

Les modèles précis décrits dans la littérature sont fortement dépendants du type de batterie considéré. D'une manière générale, ils prennent en compte :

- ▷ la température, qui limite à la fois le courant maximum et la capacité. Plus la température est basse, moins l'on peut obtenir de courant et moins la capacité de la batterie est importante ;

[32] Nous parlons ici des méthodes d'optimisation globale exactes. Les méthodes d'optimisation globale heuristiques jouent un rôle à part.

[33] Le lecteur pourra aussi se référer à l'annexe G.2 p.187.

- ▷ la variation de la capacité utilisable en fonction du niveau du courant de décharge. Cette variation est plus ou moins sensible suivant les couples électrochimiques ; elle peut être exprimée par la loi de Peukert (cf §1.1 p.3) ;
- ▷ l'acceptance de charge de la batterie (ou rendement faradique) : un courant de recharge batterie ne se traduit pas intégralement en Ampères-heure disponibles pour une décharge future ;
- ▷ les variations de tension de la batterie en décharge ou en recharge. Celles-ci sont généralement modélisées par l'intermédiaire d'une tension à vide et d'une résistance interne, parfois dépendants de l'état de charge courant (exemple de la batterie Exide Orbital sur la figure 5.2).

Dans KOALA, la batterie sera modélisée par :

- ▷ un générateur de tension E_B parfait, en série avec une résistance R_B. Afin de modéliser le comportement différent de la batterie en charge et décharge, nous utiliserons dans KOALA deux valeurs de E_B et R_B, une pour la charge, et une pour la décharge. Néanmoins, afin de simplifier l'écriture, nous ne détaillerons pas cette possibilité dans la formulation du problème d'optimisation du chapitre 6 p.71.
- ▷ une acceptance de charge que nous noterons $\nu_B \leq 1$;
- ▷ des courants minimum en charge $I_{B_{min}}$ et maximum en décharge $I_{B_{max}}$.

Nous décidons pour simplifier de ne pas prendre en considération :

- ▷ l'influence de la température et la loi de Peukert ;
- ▷ la variation de E_B et R_B avec l'état de charge courant SOC. Certains auteurs la prennent en compte [Del02, BNMB94], d'autres non [Dub02]. Nous expliquerons en §9.5 p.93 pour quelle raison celle-ci peut être négligée dans une première approche.

Notre problème sera posé de telle manière que l'état de charge absolu de la batterie ne sorte pas de la plage conseillée par le constructeur $[soc_{min}; soc_{max}]$.

5.3.2 Modélisation des moteurs thermique et électrique

5.3.2.1 Hypothèses relatives aux deux machines

Le rendement des moteurs électrique et thermique est modélisé par une ou plusieurs matrices accompagnées de deux vecteurs donnant leur domaine d'utilisation. Ces matrices sont appelées « cartographies ».

Par exemple, la cartographie de consommation instantanée en $\mathrm{g \cdot s^{-1}}$ C_{MT} du moteur thermique est définie par rapport à un couple et un régime sur l'arbre du moteur thermique : $C_{MT}(\Omega_{MT}, \Gamma_{MT})$. On néglige donc l'effet des autres paramètres pouvant influencer sur la performance des moteurs (e.g. température). Sous forme développée, on obtient :

$$\begin{array}{cc} & \begin{bmatrix} \Gamma_{MT_1} & \Gamma_{MT_2} & \dots & \Gamma_{MT_{m-1}} & \Gamma_{MT_m} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Omega_{MT_1} \\ \Omega_{MT_2} \\ \vdots \\ \Omega_{MT_{n-1}} \\ \Omega_{MT_n} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} C_{MT_{11}} & C_{MT_{12}} & \dots & C_{MT_{1,m-1}} & C_{MT_{1,m}} \\ C_{MT_{21}} & C_{MT_{22}} & \dots & C_{MT_{2,m-1}} & C_{MT_{2,m}} \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ C_{MT_{n-1,1}} & C_{MT_{n-1,2}} & \dots & C_{MT_{n-1,m-1}} & C_{MT_{n-1,m}} \\ C_{MT_{n,1}} & C_{MT_{n,2}} & \dots & C_{MT_{n,m-1}} & C_{MT_{n,m}} \end{bmatrix} \end{array}$$

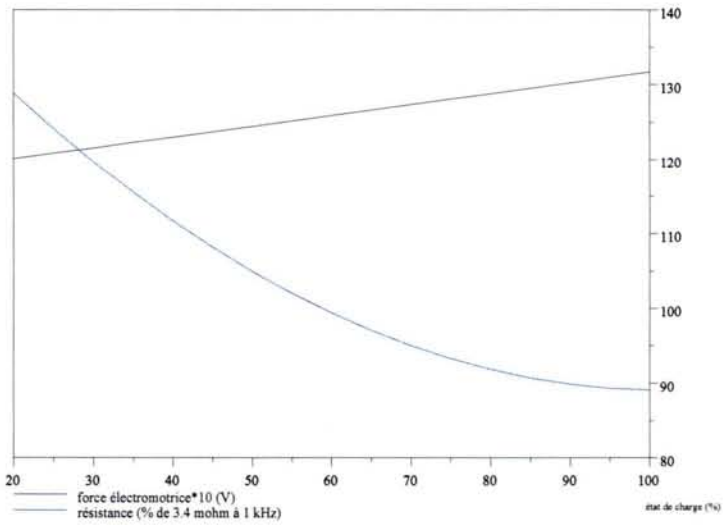


FIG. 5.2: *Caractéristiques suivant l'état de charge de la batterie Exide Orbital 12V-40 Ah Deep Cycle*

Dans le même ordre d'idée, nous modélisons les pertes totales du moteur électrique (mécaniques, Joule et fer) et de son convertisseur d'électronique de puissance associé (pertes Joule par conduction et commutation) en W sous la forme d'une cartographie $Pe(\Omega_{ME}, \Gamma_{ME})$.

Ces cartographies sont établies grâce à des mesures en régime permanent sur banc d'essai. Elles ne sont donc adaptées en théorie qu'à la description des régimes permanents. Elles seront néanmoins utilisées pour décrire les régimes transitoires (hypothèse quasi-statique).

De plus, on suppose que l'établissement de Γ_{MT} ou Γ_{ME} est suffisamment rapide par rapport à la dynamique du véhicule, ce qui est toujours vrai, sans quoi la régulation de la vitesse à la roue par le conducteur serait rendue très difficile.

Dans ces cartographies, certains points (vitesse, couple) sont irréalisables. Nous tiendrons compte de ceci en définissant des courbes de couple maximum et minimum pour les machines.

5.3.2.2 Moteur thermique

Il est donc modélisé par :

- ▷ une cartographie de consommation $C_{MT}(\Omega_{MT}, \Gamma_{MT})$ fonction du régime et du couple, avec les vecteurs de définition Ω_{MT} et Γ_{MT} correspondants ;
- ▷ des courbes de couple minimum et maximum fonction du régime $\Gamma_{MT_{min}}(\Omega_{MT})$ et $\Gamma_{MT_{max}}(\Omega_{MT})$, qui définissent l'enveloppe limite de la cartographie de consommation.

La cartographie du moteur thermique de la Peugeot 306 2.0L HDI est présentée à titre d'exemple sur la figure 5.3.

Le procédé d'obtention de cartographie sur banc moteur se heurte à diverses difficultés :

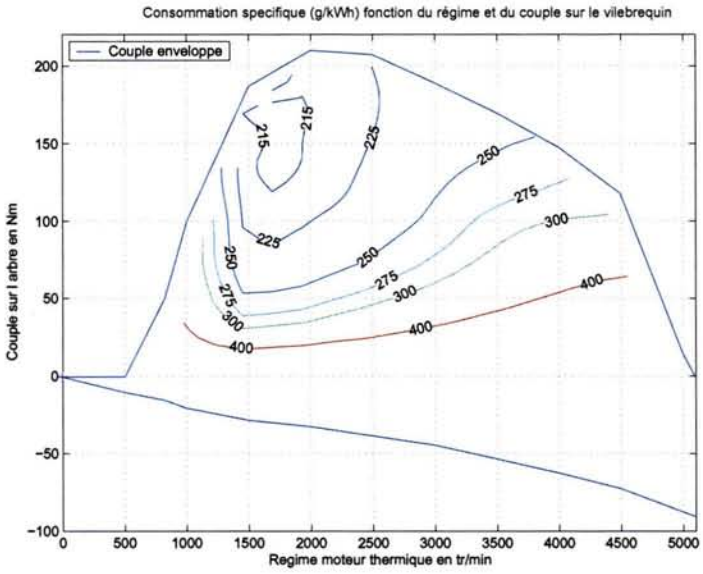


FIG. 5.3: *Cartographie du moteur thermique de la Peugeot 306 2.0L HDI*

- ▷ il est difficile d'obtenir des mesures de consommation à des vitesses proches du ralenti (de l'ordre de $800\,\mathrm{tr}\cdot\mathrm{min}^{-1}$ sur la plupart des véhicules). En effet, dès qu'on augmente le couple, des vibrations apparaissent au sein du banc : le volant d'inertie n'est plus suffisant pour filtrer les acyclismes du moteur ;
- ▷ les couples mesurés dépendent des conditions de température et de pression régnant dans la cellule d'essai ; une correction est effectuée a posteriori, suivant une formule empirique ;
- ▷ la consommation mécanique et/ou électrique des accessoires, ainsi que le système de refroidissement du moteur doivent être ajustés de manière à correspondre aux normes en vigueur, ce qui peut introduire un décalage par rapport à la réalité.

Les cartographies sont généralement[34] mesurées pour un couple positif et extrapolées ensuite de manière linéaire pour les couples négatifs. Cela revient à dire que la consommation est nulle sur la courbe de couple minimum, et monte linéairement jusqu'au couple nul. Sur la figure 5.4 sont représentées les courbes de Willans pour le moteur K9K de la Clio 1,5l dCi. On peut vérifier que cette approximation linéaire est valable pour la majorité des régimes considérés.

5.3.2.3 Moteur électrique et convertisseur associé

Ces composants sont modélisés par :

- ▷ au choix :
  - ◇ une cartographie $Pe(\Omega_{ME}, \Gamma_{ME})$ de pertes moteur électrique et convertisseur associé, fonction du régime et du couple ;
  - ◇ une cartographie $Pe(\Omega_{ME}, I_B)$ de pertes moteur électrique et convertisseur associé, fonction du régime et du courant batterie, déduite de la précédente ;

[34] Ceci n'est pas vrai sur le banc dynamique du LTE, la génératrice électrique AVL permet de réguler le régime du vilebrequin pour des couples négatifs.

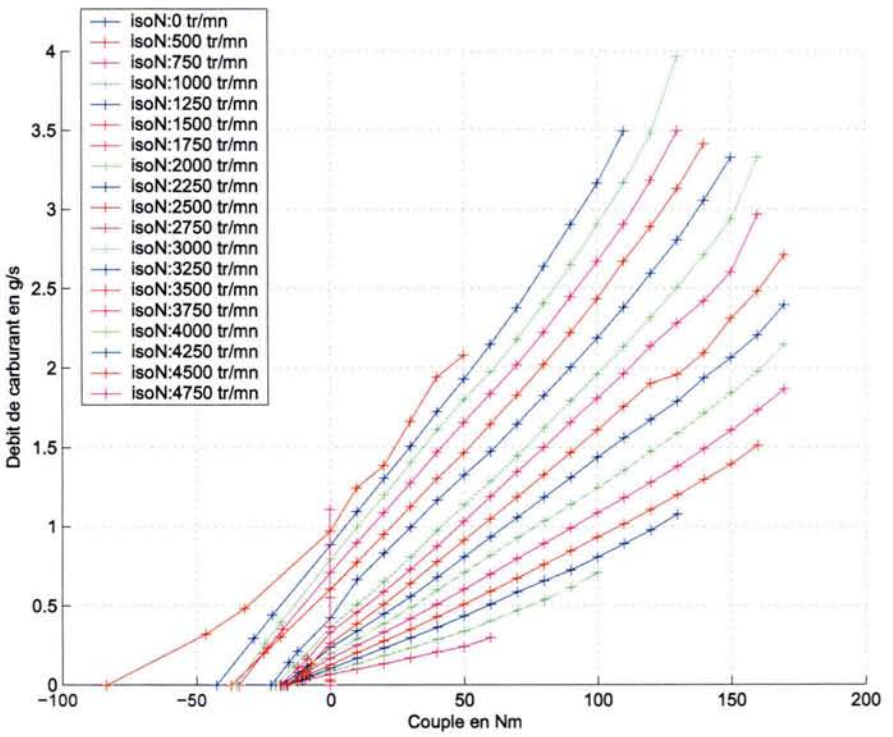


FIG. 5.4: *Courbes de Willans pour le moteur K9K*

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11
54601 VILLERS-LES-NANCY Cédex

▷ des courbes de couple minimum et maximum fonction du régime $\Gamma_{ME_{min}}(\Omega_{ME})$ et $\Gamma_{ME_{max}}(\Omega_{ME})$.

La cartographie de rendement d'un moteur électrique Unique Mobility de 30 kW et de son onduleur est présentée à titre d'exemple sur la figure 5.5, pour deux tensions d'alimentation différentes.

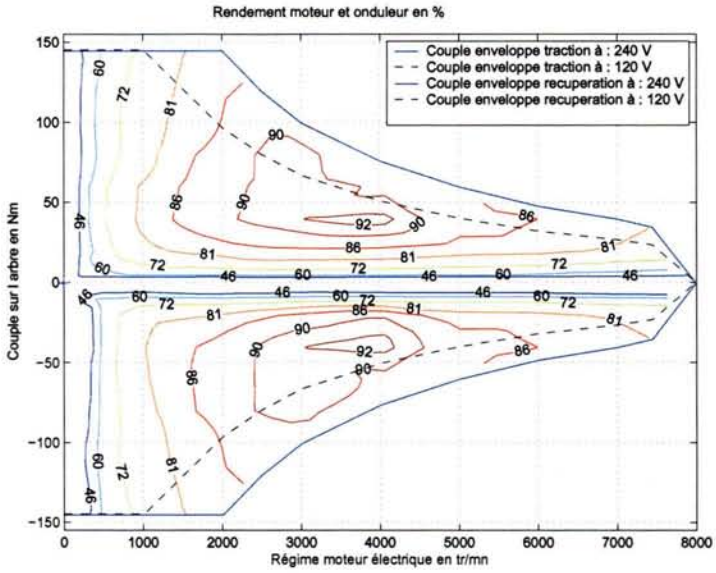


FIG. 5.5: *Exemple de la cartographie de rendement d'un moteur électrique Unique Mobility 30 kW et de son onduleur*

Notons que dans KOALA, l'onduleur associé au moteur électrique n'est pris en compte qu'à travers des pertes supplémentaires dans la cartographie du moteur électrique. Le transfert d'énergie entre la batterie et le moteur électrique est seulement examiné du point de vue de la puissance, sans prendre en compte les limitations de tension et de courant imposées par l'onduleur (cf équation 5.1 p.68). Ainsi :

▷ les courbes $\Gamma_{ME_{min}}(\Omega_{ME})$ et $\Gamma_{ME_{max}}(\Omega_{ME})$ sont recalculées en tenant compte d'éventuelles limitations dues à la puissance de la batterie. Dans la pratique, on a intérêt à ce que la batterie ne soit pas un facteur limitant pour le moteur électrique. Ceci est délicat, dans la mesure où la batterie est l'élément sensible du véhicule hybride (encombrement, poids, coût, durée de vie), et que ses caractéristiques varient beaucoup suivant les conditions de fonctionnement et son état de vieillissement ;

▷ on suppose que l'onduleur du moteur électrique permet de transformer la tension de la batterie correspondant à la puissance maximum de cette dernière, de telle manière que les tensions appliquées aux enroulements soient suffisantes pour produire les couples de l'hyperbole de puissance maximum de la cartographie. Si la tension de la batterie était trop faible, il serait possible de l'élever par un étage intermédiaire hacheur élévateur[35], le principal étant de disposer d'une puissance suffisante sur la batterie.

[35]Sur la Prius 2004 est placé un hacheur élévateur qui permet d'augmenter la tension batterie dans un facteur deux (jusqu'à 500V). Ceci permet de diminuer le nombre d'éléments de batterie à placer en série, ainsi que les pertes dans l'onduleur alimentant la machine électrique.

La cartographie de pertes fonction du régime et du courant $Pe(\Omega_{ME}, I_B)$ est déduite de la cartographie des pertes fonction du régime et du couple par la relation de conservation de la puissance dans le réseau électrique du véhicule (équation 5.1 p.68). À partir d'une valeur de régime Ω_{ME}, de couple moteur électrique Γ_{ME}, et des pertes correspondantes données par la cartographie $Pe(\Omega_{ME}, \Gamma_{ME})$, on déduit une valeur du courant batterie. On procède ainsi pour toutes les valeurs de régime et de couple permettant de définir $Pe(\Omega_{ME}, \Gamma_{ME})$. On obtient ainsi un ensemble de quadruplets :

$$\begin{pmatrix} \Gamma_{ME} \\ \Omega_{ME} \\ Pe(\Omega_{ME}, \Gamma_{ME}) \\ I_B \end{pmatrix}$$

dont on peut déduire la cartographie $Pe(\Omega_{ME}, I_B)$. Voici la méthode employée :

1. Établissement de l'ensemble des quadruplets précédemment cités. Du fait de l'impossibilité de réaliser certains points des cartographies $(\Omega_{ME}, \Gamma_{ME})$ au-delà des courbes limites, certains quadruplets auront des valeurs de courant impossibles[36] ;
2. Pour chaque régime de rotation Ω_{ME}, classement des quadruplets suivant la valeur de I_B ;
3. Établissement d'un vecteur gradué en courant $[I'_{B_{min}} \dots I'_{B_{max}}]$, ces deux valeurs extrêmes étant établies par rapport à la chaîne de traction considérée, c'est-à-dire limitées soit par la puissance maximum du moteur électrique, soit par les limites de courant données par le constructeur de la batterie. À titre d'information, pour la batterie Exide Orbital 12 V-40 Ah Deep Cycle évoquée en §5.3.1, la limite de courant en décharge est 800A (i.e. 20C) pendant $5\,s$;
4. Interpolation des pertes à partir des quadruplets pour une valeur de régime et un courant du vecteur gradué $[I'_{B_{min}} \dots I'_{B_{max}}]$;
5. Mise en forme de $Pe(\Omega_{ME}, I_B)$.

On aura tout intérêt à graduer le vecteur de courant batterie $[I'_{B_{min}} \dots I'_{B_{max}}]$ assez finement, afin de diminuer l'erreur engendrée lors de l'utilisation de $Pe(\Omega_{ME}, I_B)$. En effet, comme nous allons le voir, un problème peut survenir si on est amené à utiliser les matrices $Pe(\Omega_{ME}, \Gamma_{ME})$ puis $Pe(\Omega_{ME}, I_B)$ l'une après l'autre, dans les relations 5.1 et 5.2.

À partir de $Pe(\Omega_{ME}, \Gamma_{ME})$, d'une valeur de Γ_{ME} et de Ω_{ME}, on peut déterminer le courant batterie I_B grâce à la relation 5.1. Puis, à partir de I_B, de Ω_{ME}, et de la seconde matrice, on peut déterminer Γ_{ME} à partir de la relation 5.2. Si l'on note f la fonction de $\mathbb{R}^2$ dans $\mathbb{R}$, qui à Γ_{ME} et Ω_{ME} associe I_B, et g la fonction de $\mathbb{R}^2$ dans $\mathbb{R}$, qui à I_B et Ω_{ME} associe Γ_{ME}, la problématique est de chiffrer et limiter la différence $|\Gamma_{ME_2} - \Gamma_{ME_1}|$, où $\Gamma_{ME_2} = g\left(f\left(\Gamma_{ME_1}, \Omega_{ME}\right), \Omega_{ME}\right)$. Plus la discrétisation du vecteur de courant batterie $[I'_{B_{min}} \dots I'_{B_{max}}]$ permettant de calculer $Pe(\Omega_{ME}, I_B)$ est fine, plus $|\Gamma_{ME_2} - \Gamma_{ME_1}|$ sera faible.

5.3.3 Transmission et embrayage

Les éléments de la transmission où les pertes sont les plus importantes sont modélisés par un rapport de réduction et un rendement correspondants.

[36] Dans la pratique, ces valeurs sont fixées à NaN.

Nous scindons le rendement de telle manière qu'il s'écrive comme le produit d'un rendement en couple par un rendement en régime. Cela paraît pertinent, d'une part parce que les calculs se feront en dissociant couple et régime, et d'autre part parce que certains éléments sont particulièrement adaptés à ce type de description. Par exemple, les modélisations de CVT dissocient les phénomènes de pertes de couple par frottement, des pertes de vitesse par glissement [Dum02].

Nous ne prendrons en compte le sens du transfert énergétique au sein des divers composants considérés qu'à partir de la formulation du problème d'optimisation globale en chapitre 6.

5.3.3.1 Boîte de vitesse conventionnelle

Dans le cadre d'une optimisation globale, il est difficile de prendre en compte les transitoires des composants du véhicule, car cela conduit à une explosion combinatoire. C'est pourquoi nous considérons que les changements de rapport de boîte sont instantanés.

Du fait de l'entraînement par engrenages, on peut supposer que les pertes dans une boîte de vitesse conventionnelle sont avant tout des pertes de couple par frottements, dépendant du rapport de réduction noté $k_{BV}(r_{BV})$. Le facteur r_{BV} évolue entre 0 (point mort) et le nombre de rapports (5 pour une boîte à cinq rapports), tandis que k_{BV} représente le rapport de réduction réel qui lui correspond.

On obtient donc les expressions suivantes concernant le rendement en couple η_Γ, le rendement en puissance η_P, et le rendement en vitesse η_Ω, de la boîte de vitesse (cf liste des symboles et notations en début d'ouvrage) :

$$\eta_{\Gamma_{BV}}(r_{BV}) = \eta_{P_{BV}}(r_{BV})$$

$$\eta_{\Omega_{BV}} = 1$$

5.3.3.2 Courroie

Les pertes dans une courroie se divisent en pertes de vitesse et pertes de couple. Nous considérons en première approximation que le partage est égal, c'est-à-dire que ces deux rendements sont égaux à la racine carrée du rendement en puissance.

$$\eta_{\Omega_{CO}} = \eta_{\Gamma_{CO}} = \sqrt{\eta_{P_{CO}}}$$

5.3.3.3 Embrayage

Dans les architectures où le moteur thermique doit être lié directement à la roue lors des phases de traction, à faible vitesse véhicule l'embrayage est nécessaire. Puisqu'on suppose les changements de rapport instantanés, sa modélisation est minimaliste. Nous désignerons l'état de l'embrayage par un nombre réel compris entre 0 et 1, r_{EMB} :

▷ $r_{EMB} = 1$: embrayage fermé, le passage du couple et de la vitesse est supposé parfait :

$$\eta_{\Gamma_{EMB}} = \eta_{\Omega_{EMB}} = 1$$

▷ $r_{EMB} = 0$: embrayage ouvert, aucune puissance ne peut transiter ;

$$\eta_{\Gamma_{EMB}} = \eta_{\Omega_{EMB}} = 0$$

▷ sinon, on est en phase de patinage. Du fait de l'hypothèse quasi-statique employée pour la modélisation, on considère que le couple au primaire de l'embrayage est égal au couple au secondaire (sans quoi la vitesse d'un des arbres tenderait à augmenter, et l'autre à diminuer). Le rendement en couple est donc égal à 1 :

$$\eta_{\Gamma_{EMB}} = 1$$

Les vitesses au primaire et secondaire sont alors dépendantes des composants en amont du primaire et en aval du secondaire[37]. Dans le cas où le primaire tourne plus vite que le secondaire, les pertes sont données par l'équation de conservation de la puissance :

$$C_p \cdot \Omega_p = C_S \cdot \Omega_S + \text{pertes de glissement}$$

et le rendement en vitesse (égal au rendement en puissance car $\eta_{\Gamma_{EMB}} = 1$) par :

$$\eta_{\Omega_{EMB}} = \frac{C_S \cdot \Omega_S}{C_p \cdot \Omega_p} = \frac{\Omega_S}{\Omega_P} < 1$$

On conviendra que dans ce cas $r_{EMB} = \frac{\Omega_S}{\Omega_P} \in]0;1[$.
En résumé :

$$\eta_{\Omega_{EMB}} = \begin{cases} O & \text{si } r_{EMB} = 0 \\ \frac{\Omega_s}{\Omega_p} & \text{si } r_{EMB} \in]0;1[\\ 1 & \text{si } r_{EMB} = 1 \end{cases}$$

5.3.3.4 Différentiel

Comme pour la boîte de vitesses, on considère qu'il n'y a pas de pertes de vitesses dans le différentiel, uniquement des pertes en couple :

$$\eta_{\Gamma_{DIFF}} = \eta_{P_{DIFF}}$$

$$\eta_{\Omega_{DIFF}} = 1$$

5.3.4 Réseau électrique de bord

Les accessoires électriques sont modélisés par une puissance prélevée constamment sur le bus continu. Celle-ci peut être constante tout au long du cycle de vitesse, ou bien varier à chaque instant.

[37] Contrairement à ce qui se passe dans un modèle dynamique, où ce sont le couple en amont du transfert de puissance (par exemple, secondaire, resp. primaire) et l'ouverture plus ou moins prononcée de l'embrayage qui fixent la vitesse en aval du transfert de puissance (par exemple, primaire, resp. secondaire). La montée en vitesse est plus ou moins rapide, suivant la différence de couple entre primaire et secondaire et les inerties des divers composants.

Pour l'architecture électrique 12V/42V considérée sur la figure 5.6, on ne prend en compte que la batterie 42V, modélisée telle que décrit en 5.3.1. La relation de conservation de la puissance entre le moteur électrique, les accessoires, et la batterie, s'écrit alors :

$$(E_B - R_B.I_B).I_B = \Gamma_{ME}.\Omega_{ME} + Pe(\Omega_{ME}, \Gamma_{ME}) + P_{ACC} \tag{5.1}$$

ou bien, si l'on considère les pertes moteur électrique et convertisseur associé en fonction de son régime et du courant batterie :

$$(E_B - R_B.I_B).I_B = \Gamma_{ME}.\Omega_{ME} + Pe(\Omega_{ME}, I_B) + P_{ACC} \tag{5.2}$$

Dans ces deux équations, $Pe(\Omega_{ME}, \Gamma_{ME})$, $Pe(\Omega_{ME}, I_B)$, Ω_{ME}, et P_{ACC} sont positifs, tandis que I_B et Γ_{ME} sont des grandeurs algébriques.

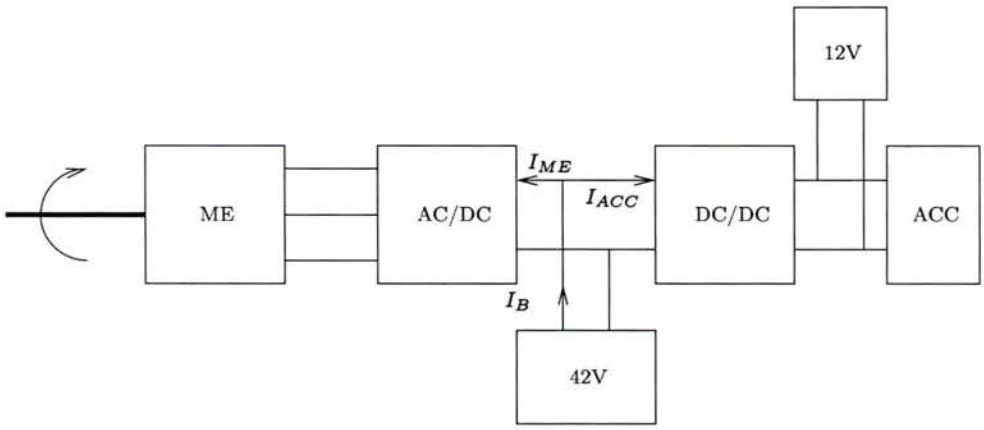


FIG. 5.6: *Architecture électrique type du véhicule hybride dans un cadre bi-tension 12/42V*

Si l'on pose $P_B = \Gamma_{ME}.\Omega_{ME} + Pe(\Omega_{ME}, \Gamma_{ME}) + P_{ACC}$, on obtient :

$$(E_B - R_B.I_B).I_B = P_B$$

C'est une équation du second degré d'inconnue I_B et admettant donc zéro ou deux solutions de courant[38] (figure 5.7) :

- ▷ zéro solution lorsque P_B est supérieure à $P_{B_{max}} = \frac{E_B^2}{4 \cdot R_B}$;
- ▷ deux solutions I_{B_1} et I_{B_2} dans le cas contraire.
  A priori, il n'est pas possible de rejeter systématiquement une des deux solutions. Néanmoins, lorsque $P_B \neq 0$, c'est la solution à courant le plus faible I_{B_1} qui est à privilégier, c'est-à-dire celle qui possède le meilleur rendement énergétique :

$$I_B = I_{B_1} = \frac{E_B}{2 \cdot R_B} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 R_B P_B}{E_B^2}}\right)$$

[38]Dans un problème physique, généralement la racine double n'a pas de sens physique, ceci à cause des erreurs de modèle, inévitables.

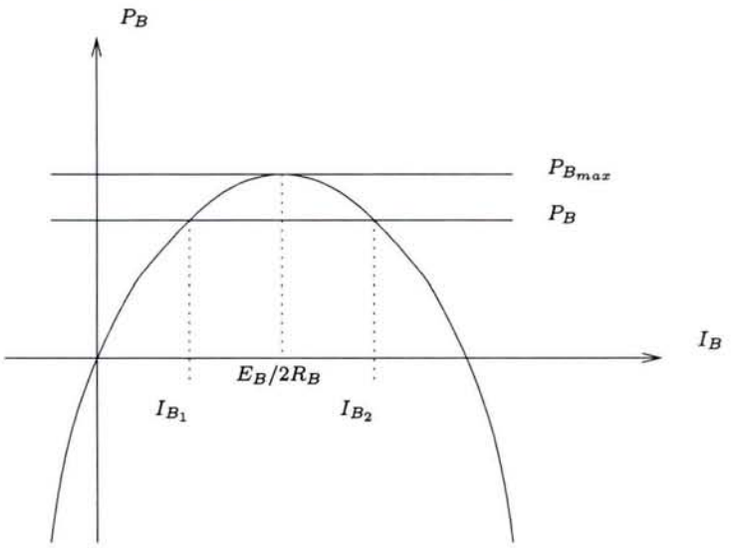


FIG. 5.7: *Caractéristique batterie*

En effet, I_{B_2} réalise la même puissance avec des pertes Joule supplémentaires. La solution I_{B_1} nous assure que la tension batterie ne descendra pas en-dessous de $E_B/2$.
I_{B_1} peut être atteint en choisissant de manière pertinente la charge en parallèle sur la batterie[39].
Une charge à faible impédance aura tendance à faire monter I_B au dessus de $E_B/(2.R_B)$, ce qui revient à privilégier I_{B_2}. Ceci peut arriver si l'on fait accélérer le moteur électrique rapidement, celui-ci étant initialement à l'arrêt : on exige trop de tension de commande, la force contre électromotrice et l'impédance de la charge (le moteur électrique) étant faible et les interrupteurs du convertisseur ayant un rapport cyclique de conduction important, le courant batterie a tendance à dépasser $E_B/(2.R_B)$. Si ceci pose problème au niveau thermique, la solution consiste à ajouter des capacités de découplage afin d'assurer la fonction tampon de courant, et/ou à limiter la montée du couple sur le moteur électrique.

Quoi qu'il en soit, ce modèle de batterie n'est plus valable quand on s'approche de $I_B = E_B/R_B$. Par exemple, on a $E_B/R_B \approx 4000\,A$ pour la batterie Exide Orbital Deep Cycle, alors que le courant de court-circuit donné par le constructeur est $1500\,A$.

Notons d'autre part que dans le cadre de ce modèle, la puissance maximale délivrable par la batterie $P_{B_{max}} = \frac{E_B^2}{4 \cdot R_B}$ est inversement proportionnel à la résistance batterie. Pour une tension $E_B = 14V$, on a $P_{B_{max}} = 4,9\,\text{kW}$ si $R_B = 0,01\,\Omega$, mais seulement $P_{B_{max}} = 98\,\text{W}$ si $R_B = 0,5\,\Omega$.

[39]Dans le problème de l'adaptation d'impédance, on choisit la charge (par exemple une résistance) de manière à maximiser le transfert de puissance entre la batterie et la charge, c'est-à-dire de telle manière que la batterie fournisse $P_{B_{max}}$. Notre problème en constitue une extension, puisqu'on ne cherche plus à se placer à $P_{B_{max}}$, mais à une valeur $P_B < P_{B_{max}}$ donnée : pour la caractéristique $P_B = f(I_B)$ considérée, cette fois-ci deux solutions sont possibles. On cherche à atteindre celle qui donne le courant le plus faible.

Chapitre 6

Formulation du problème d'optimisation globale

La démarche de formulation que nous proposons ici est applicable pour tout véhicule hybride. Néanmoins, nous la détaillons pour l'architecture hybride parallèle à deux embrayages, puisque c'est celle qui est disponible sur le banc dynamique de l'INRETS. Cette architecture a été représentée sur la figure 2.9 p.32. Elle a été choisie pour l'étude menée en collaboration avec Valeo, Exide, et l'ADEME, du fait de son fort potentiel de gain en consommation a priori.

L'embrayage un EMB_1 est situé entre le moteur thermique et le moteur électrique, l'embrayage deux EMB_2 entre le moteur électrique et la boîte de vitesses. On traite la situation où le moteur électrique est lié au vilebrequin via une courroie (c'est la configuration présente sur le banc dynamique du LTE).

D'autres architectures ont également fait l'objet d'une optimisation globale (voir §8.4 p.89), cependant nous ne rentrerons pas dans le détail de la formulation des problèmes correspondants.

Comme indiqué ci-dessus, nous choisissons de fixer le dimensionnement du véhicule, la puissance des accessoires, et le cycle de conduite vitesse/temps, et nous cherchons la loi de gestion d'énergie optimale par rapport au critère consommation totale de carburant sur le cycle. Le problème est discrétisé, le pas temporel étant égal à $T_e = 1\mathrm{s}$, comme dans les cycles normalisés.

Nous décomposons le problème de la même manière que J.-C. Culioli dans [Cul94] lorsqu'il s'intéresse au principe du maximum de Pontryaguine : critère de coût, équation d'état, conditions limites, contraintes instantanées, contraintes d'état, et commandes admissibles.

La variable d'état étant l'état de charge de la batterie, nous choisissons comme équation d'état celle régissant son évolution.

6.1 Critère de coût

Il s'agit de minimiser le critère de coût énergétique suivant, dépendant du dimensionnement (dim), du cycle (cyc), et de la puissance des accessoires (acc) qu'on s'est fixés :

$$J(\mathrm{dim}, \mathrm{acc}, \mathrm{cyc}) = \sum_{i=0}^{n-1} C_{MT_i}(\Omega_{MT_i}, \Gamma_{MT_i}) \tag{6.1}$$

C_{MT_i} représente la quantité de carburant correspondant à l'application sur le moteur thermique, entre les temps $i \cdot T_e$ et $(i+1) \cdot T_e$, du couple Γ_{MT_i} à la vitesse Ω_{MT_i}.

Ce critère est un coût de type intégral au sens de [Cul94]. Le problème ne comprend pas de coût final.

La formulation du problème est pour l'instant incomplète : nous ne savons pas encore par rapport à quelles commandes nous allons minimiser $J(\mathrm{dim}, \mathrm{acc}, \mathrm{cyc})$.

6.2 Équation d'état

Nous avons fixé en §5.1 p.57 l'état de charge de la batterie comme variable d'état. Avec le modèle de batterie considéré en §5.3.1 p.59, son expression est la suivante :

$$SOC_{r_{i+1}} = \begin{cases} SOC_{r_i} - I_{B_i} & \text{si } I_{B_i} \geq 0 \\ SOC_{r_i} - I_{B_i} \cdot \nu_B & \text{si } I_{B_i} < 0 \end{cases} \tag{6.2}$$

6.3 Conditions limites

Il faut imposer une contrainte de maintien de l'état de charge de la batterie, sans quoi le problème de minimisation se résoudrait en utilisant dans les phases de traction le moteur thermique au minimum et le moteur électrique au maximum (dans les limites autorisées par les cartographies bien entendu). Ceci se traduirait inévitablement par une forte décharge de la batterie, ce que l'on veut éviter. En particulier, on voudra travailler à bilan batterie nul afin de pouvoir comparer des consommations de carburant de véhicules différents. Pour l'instant, plaçons-nous dans le cas le plus général d'une différence d'état de charge ΔSOC entre le début et la fin du cycle. Nous obtenons les conditions limites suivantes :

$$SOC_{r_0} = 0,\ SOC_{r_n} = \Delta SOC \tag{6.3}$$

Dans les expressions analytiques suivantes, il faudrait en toute rigueur indicer l'ensemble des grandeurs physiques avec l'indice temporel correspondant, i. Nous ne le faisons pas afin de simplifier les écritures.

6.4 Contraintes instantanées de type égalité

Les phénomènes physiques liant les diverses variables endogènes au système, autres que l'état de charge relatif, vont se trouver exprimées dans le problème sous forme de contraintes instantanées de type égalité.

6.4.1 Conservation de la puissance dans la transmission.

Celle-ci peut s'exprimer en la dissociant en une relation sur les couples d'une part, et une relation sur les vitesses d'autre part. Nous rappelons que le cycle de conduite vitesse/temps est connu, et

par conséquent, Ω_R l'est à chaque instant. En tenant compte de l'accélération à produire et des forces de résistance au roulement, on déduit Γ_R[40], qui est donc connu à chaque instant lui aussi.

Précisons d'abord la valeur des rendements en couple et en vitesse des courroies, des embrayages, de la boîte de vitesses et du différentiel, pour le cas du VHTE deux embrayages[41]. Nous utilisons pour cela les notations introduites en §5.3.3 p.65, soit :

▷ *courroie* : rendement en vitesse et en couple pour le passage du vilebrequin vers le moteur électrique

$$\eta\Omega_{CO} = \eta\Gamma_{CO} = \begin{cases} \sqrt{\eta_{PCO}}^{-1} & \text{si } \Gamma_{ME} > 0 \\ \sqrt{\eta_{PCO}} & \text{sinon} \end{cases}$$

▷ *embrayages* :

◇ rendement en couple des embrayages, dans le sens moteur thermique vers roue

$$\eta\Gamma_{EMB_i} = \begin{cases} O & \text{si } r_{EMB_i} = 0 \\ 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{pour } i = 1 \text{ ou } 2$$

◇ rendement en vitesse des embrayages, dans le sens moteur thermique vers roue

$$\eta\Omega_{EMB_1} = \begin{cases} O & \text{si } r_{EMB_1} = 0 \\ \frac{\Omega_{R_{MT}}}{\Omega_{MT_{ral}}} & \text{si } \Omega_{R_{MT}} < \Omega_{MT_{ral}} \text{ et } r_{EMB_2} = 1 \\ 1 & \text{si } r_{EMB_1} = 1 \end{cases}$$

$$\eta\Omega_{EMB_2} = \begin{cases} O & \text{si } r_{EMB_2} = 0 \\ \frac{\Omega_{R_{MT}}}{\Omega_{MT_{ral}}} & \text{si } \Omega_{R_{MT}} < \Omega_{MT_{ral}} \text{ et } r_{EMB_1} = 1 \\ 1 & \text{si } r_{EMB_2} = 1 \end{cases}$$

On constate que l'on dispose de cinq possibilités en ce qui concerne l'état des embrayages :

▷ soit EMB_1 et EMB_2 sont ouverts. Ce cas peut arriver en freinage mécanique (moteur thermique stoppé), à l'arrêt du véhicule, ou bien à faible vitesse véhicule en fin de décélération[42] ;

▷ soit EMB_1 est fermé et EMB_2 ouvert. Ceci sera le cas lorsque le moteur thermique recharge la batterie à l'arrêt. Cela peut être intéressant lorsqu'une forte puissance est consommée par les accessoires électriques, ou en phase de chauffe du moteur thermique ;

▷ soit EMB_1 patine et EMB_2 est fermé, soit EMB_1 est fermé et EMB_2 patine. Cela est le cas lorsqu'on est en phase de traction et que la vitesse du véhicule n'est pas suffisante pour pouvoir embrayer le moteur thermique, même pour le rapport de démultiplication le plus court ($k_{BV}(1)$) ;

▷ soit EMB_1 et EMB_2 sont fermés. Ceci sera le cas en phase de boost ou de flux série, à assez grande vitesse véhicule pour que le moteur thermique puisse être embrayé ;

▷ soit EMB_1 est ouvert et EMB_2 fermé, cela correspond soit à une phase de traction en tout électrique, soit à de la récupération au freinage, moteur thermique stoppé.

[40] Comme indiqué en §5.2 p.59, Γ_R est déterminé grâce au logiciel de simulation forward VEHLIB, développé au LTE. Ceci aurait pu aussi être effectué directement dans le logiciel d'optimisation globale KOALA.

[41] Les valeurs des rendements de ces composants pris individuellement ont été exprimées dans le chapitre 5.

[42] Ici nous décidons qu'en fin de décélération, et s'il est possible d'éteindre le moteur thermique (pas de flux série nécessaire pour recharger la batterie à l'arrêt), les deux embrayages sont ouverts. On aurait pu choisir de n'ouvrir que celui du moteur thermique. De toute façon, cela n'a pas d'incidence sur la consommation de carburant, puisque les ouvertures et fermetures des embrayages sont supposées instantanées.

L'ensemble des possibilités est résumé dans le tableau 6.1, avec les conditions sur les couple et vitesse roue correspondants. ***elhyb*** est un drapeau indiquant l'usage du moteur thermique ou pas (***elhyb*** $= 1$ lorsque le moteur thermique est allumé). Notons que lorsque ***elhyb*** est égal à 1, le moteur électrique peut ne pas participer à la traction ou à la récupération au freinage. Il est donc par exemple possible d'avoir un mode « tout thermique » lorsque les deux embrayages sont fermés et que $\Gamma_{ME} = 0$.
Γ_{R_S} et Ω_{R_S} sont des valeurs de seuils, relativement faibles, permettant de distinguer les divers modes entre eux.

conditions sur Γ_R et Ω_R	commandes embrayages à appliquer		contraintes instantanées supplémentaires spécifiques à l'état considéré	Modes de fonctionnement correspondants	*elhyb*
	r_{EMB_1}	r_{EMB_2}			
$(\lvert\Gamma_R\rvert \leq \Gamma_{R_s}$ et $\Omega_R \leq \Omega_{R_s})$ ou $(\Gamma_R \leq 0$ et $\Omega_{R_{MT}} \leq \Omega_{MT_{min}})$	0	0	$r_{BV} = 0$ et $\Omega_{MT} = \Gamma_{MT} = 0$	(freinage mécanique, arrêt du véhicule) ou (vitesse véhicule faible et couple roue négatif)	0 par convention
$\lvert\Gamma_R\rvert \leq \Gamma_{R_s}$ et $\Omega_R \leq \Omega_{R_s}$	1	0	$r_{BV} = 0$ et $\Omega_{MT} = \Omega_{MT_{min}}$	marche MT flux série à l'arrêt (ou pas)	1
$\Gamma_R \geq 0$ et $\Omega_{R_{MT}} \leq \Omega_{MT_{min}}$	$\in]0;1[$ 1	1 $\in]0;1[$	$r_{BV} = 1$ et $\Omega_{MT} = \Omega_{MT_{min}}$	boost, avec moteur thermique à faible régime	1
$\Omega_{R_{MT}} \geq \Omega_{MT_{min}}$	1	1		boost, ou flux série (en traction ou avec récupération au freinage)	1
$\lvert\Gamma_R\rvert \geq \Gamma_{R_s}$	0	1	$\Omega_{MT} = \Gamma_{MT} = 0$	mode tout électrique ou récupération au freinage	0

TAB. 6.1: *Résumé des possibilités de la chaîne de traction en correspondance avec l'état des embrayages.*

▷ *boîte de vitesse* : rendement en vitesse et en couple, dans le sens moteur thermique vers roue, r_{BV} étant le rapport de boîte courant

$$\eta_{\Gamma_{BV}}(r_{BV}) = \begin{cases} \eta_{P_{BV}}(r_{BV}) & \text{si } \Gamma_R > 0 \\ \eta^{-1}_{P_{BV}}(r_{BV}) & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\eta_{\Omega_{BV}} = 1$$

▷ *différentiel* : rendement en vitesse et en couple, dans le sens moteur thermique vers roue

$$\eta_{\Gamma_{DIFF}} = \begin{cases} \eta_{DIFF} & \text{si } \Gamma_R > 0 \\ \eta^{-1}_{DIFF} & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\eta_{\Omega_{DIFF}} = 1$$

Ces expressions étant posées, on peut exprimer la relation entre les couples dans la chaîne de traction :

$$\Gamma_R = k_{DIFF} \cdot \eta_{\Gamma_{DIFF}} \cdot k_{BV}(r_{BV}) \cdot \eta_{\Gamma_{BV}}(r_{BV}) \cdot \eta_{\Gamma_{EMB_2}} \cdot [k_{CO} \cdot \eta_{\Gamma_{CO}} \cdot \Gamma_{ME} + \eta_{\Gamma_{EMB_1}} \Gamma_{MT}] \quad (6.4)$$

Ainsi que les relations sur les vitesses :

$$\Omega_{ME} = k_{CO} \cdot \eta_{\Omega_{CO}} \cdot \eta_{\Omega_{EMB_2}} \cdot k_{BV}(r_{BV}) \cdot \eta_{\Omega_{BV}} \cdot k_{DIFF} \cdot \eta_{\Omega_{DIFF}} \cdot \Omega_R \tag{6.5}$$

$$\Omega_{MT} = \Omega_{ME} \cdot k_{CO}^{-1} \cdot \eta_{\Omega_{CO}}^{-1} \cdot \eta_{\Omega_{EMB_1}} \tag{6.6}$$

6.4.2 Équation électrique du véhicule

Elle est établie au noeud de courant compris entre le moteur électrique, la batterie, et les accessoires (cf figure 5.6 p.68) :

$$(E_B - R_B \cdot I_B) \cdot I_B = \Gamma_{ME} \cdot \Omega_{ME} + Pe(\Omega_{ME}, \Gamma_{ME}) + P_{ACC} \tag{6.7}$$

6.5 Contraintes instantanées de type inégalité

Ici nous exprimons sous forme analytique les limites des composants de la chaîne de traction. Les composants critiques sont le moteur électrique, le moteur thermique, et la batterie. Nous supposons que les autres composants (e.g. la transmission) sont sur-dimensionnés.

Nous obtenons les contraintes suivantes.

6.5.1 Limitation des couples et vitesses des moteurs thermique et électrique dans leurs cartographies respectives

$$\begin{cases} 0 \leq \Omega_{ME} \leq \Omega_{ME_{max}} \\ \Gamma_{ME_{min}}(\Omega_{ME}) \leq \Gamma_{ME} \leq \Gamma_{ME_{max}}(\Omega_{ME}) \end{cases} \tag{6.8}$$

$$\begin{cases} 0 \leq \Omega_{MT} \leq \Omega_{MT_{max}} \\ \Gamma_{MT_{min}}(\Omega_{MT}) \leq \Gamma_{MT} \leq \Gamma_{MT_{max}}(\Omega_{MT}) \end{cases} \tag{6.9}$$

6.5.2 Limitation du courant batterie au courant maximum en charge et en décharge

$$I_{B_{min}} \leq I_B \leq I_{B_{max}} \tag{6.10}$$

6.6 Contraintes d'état

Nous avons spécifié en §5.3.1 p.59 qu'il est nécessaire de restreindre l'évolution de l'état de charge relatif SOC_r de telle manière que l'état de charge absolu SOC reste dans la plage préconisée par le constructeur de la batterie, $[soc_{min}; soc_{max}]$:

$$soc_{min} \leq SOC \leq soc_{max} \tag{6.11}$$

En réalité, bien que le logiciel développé puisse prendre en compte cette contrainte, il se trouve que dans les calculs que nous avons eu à effectuer, celle-ci n'a jamais été saturée. La décharge maximale sur le cycle pour $\Delta SOC_r = 0$ s'élevait à quelque pour-cents de la capacité batterie C_B (voir chapitre 9 p.91)

6.7 Définition du système et de ses variables de commande, commandes admissibles du problème

Une fois les équations posées, il s'agit de définir les variables de commande du système véhicule hybride considéré. Nous disposons de 4 équations, qui sont les quatre contraintes instantanées de type égalité énoncées précédemment : 6.4, 6.5, 6.6, 6.7. Le problème comporte 8 inconnues : Γ_{MT}, Ω_{MT}, I_B, Γ_{ME}, Ω_{ME}, r_{EMB_1}, r_{EMB_2}, r_{BV}. Il est donc nécessaire de choisir 4 variables de commande parmi les 8 inconnues. Nous choisissons le quadruplet (Γ_{ME}, r_{BV}, r_{EMB_1}, r_{EMB_2}). Le problème de commande obtenu est représenté sur la figure 6.1.

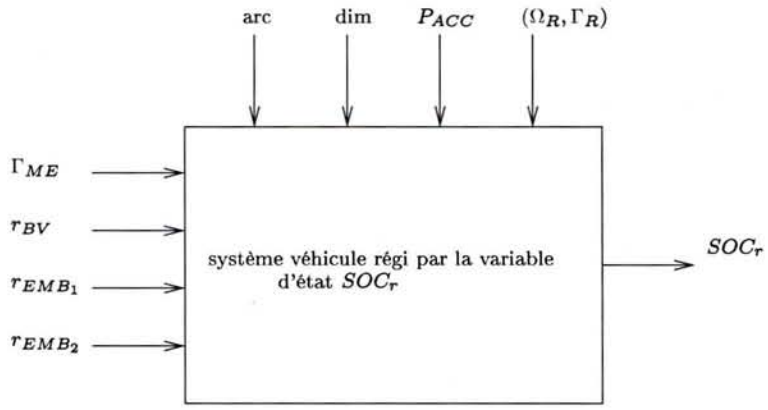


FIG. 6.1: *Expression du problème de commande du VHTE à deux embrayages*

À chaque instant, il est possible d'interdire une ou plusieurs catégories de commandes. Cela revient à restreindre plus ou moins l'espace des commandes *admissibles* du système. Par exemple, il est possible :

- ▷ d'interdire le flux série ;
- ▷ d'interdire la récupération au freinage ;
- ▷ d'interdire la récupération au freinage, et n'autoriser que le flux série nécessaire à la compensation de la décharge batterie due aux accessoires.

Nous utiliserons ce principe de limitation de l'espace des commandes admissibles afin de mettre en évidence par différence les divers gains dus à l'hybridation : flux série, récupération au freinage, etc. Nous reviendrons sur ce point en 10 p.103.

Notons qu'il est possible que, sous certaines conditions, le système *ne soit pas commandable*, c'est-à-dire qu'il ne soit pas possible d'atteindre l'état de charge $SOC_{r_n} = SOC_{r_0} + \Delta SOC$ à partir de SOC_{r_0}, sous les contraintes spécifiées. Cela est par exemple le cas lorsqu'on interdit le flux série, et que les accessoires demandent une forte puissance électrique à la batterie.

Il est également possible que certaines contraintes ne puissent tout simplement pas être respectées, même avec l'espace de commandes admissibles le plus étendu possible. Par exemple, il peut être impossible de satisfaire la puissance à la roue si les moteurs thermique et électrique ne sont pas assez puissants.

Chapitre 7

État de l'art concernant la résolution du problème d'optimisation globale ; méthode employée

L'objectif de ce chapitre est de décrire les caractéristiques du problème considéré dans le chapitre 6, et de décrire les méthodes utilisées dans la littérature pour le résoudre. Nous choisirons une méthode et la décrirons brièvement.

7.1 Analyse du problème considéré

Le but est de résoudre le problème présenté dans le chapitre précédent, c'est-à-dire la minimisation du critère 6.1, tenant compte :

- ▷ de l'équation d'état 6.2 ;
- ▷ des conditions limites 6.3 ;
- ▷ des contraintes instantanées de type égalité 6.4, 6.5, 6.6, 6.7 ;
- ▷ des contraintes instantanées de type inégalité 6.8, 6.9, 6.10 ;
- ▷ de la contrainte d'état 6.11 ;
- ▷ de l'ensemble des commandes admissibles à chaque instant :
  - ◇ autorisation de la récupération au freinage ou pas ;
  - ◇ autorisation du flux série ou pas ;
  - ◇ limitation du flux série à la quantité nécessaire à la recharge des accessoires.

Comme l'indique N. Venot dans [Ven01], le problème considéré est :

- ▷ *hybride*, car il comporte à la fois des variables continues et discrètes ;
- ▷ *non différentiable*, car certaines variables sont discrètes ;
- ▷ *non linéaire*, par exemple du fait de la présence des cartographies des moteurs électrique et thermique, qui ne le sont pas.

7.2 État de l'art concernant la résolution du problème considéré

Les méthodes d'optimisation présentées dans la littérature peuvent se classer en deux catégories :

- ▷ d'un côté, les méthodes exactes de commande optimale[43], qui permettent d'obtenir les commandes atteignant l'optimum global, au prix d'une complexité, d'un temps de calcul, et d'un encombrement mémoire variables. Parmi celles-ci, deux grandes catégories se dégagent :
  - ◇ celles utilisant le PRINCIPE DU MAXIMUM DE PONTRYAGUINE, permettant de calculer des commandes en boucle ouverte [Cul94], avec relativement peu de moyens de calculs ;
  - ◇ celles utilisant le principe de la PROGRAMMATION DYNAMIQUE, permettant de calculer des commandes en boucle fermée [Cul94], mais souvent avec des moyens de calculs et d'encombrement mémoire prohibitifs. Ceci est réalisé via la résolution de l'équation de Hamilton-Bellman-Jacobi (HBJ) [Cul03b, Cul03a, Cul94, BDTR+90].
- ▷ de l'autre côté, un certain nombre de méthodes heuristiques, demandant un encombrement mémoire variable, mais presque toujours présentant un temps de calcul prohibitif. De plus, on connaît les difficultés que peut poser le réglage des méthodes heuristiques afin d'obtenir une solution satisfaisante au problème posé :
  - ◇ les méthodes de type *recuit simulé* ont été testées par S. Delprat [Pag99, Del02]. Les solutions fournies sont des optimum locaux, néanmoins proches de l'optimum global. S.Delprat fait état de temps de calcul longs et de réglage des paramètres délicat ;
  - ◇ d'autres approches sont envisageables, par exemples les *algorithmes génétiques*. Dans ce cas, il faut formuler le problème en termes de génétique (définition de la population, des enfants, des critères d'hérédité, etc.) ce qui n'est pas toujours intuitif. De plus, cela nécessite parfois beaucoup de réglages [Ros04]. Nous avons envisagé d'utiliser la méthode des colonies de fourmis (basée sur le principe des phéromones), mais elle s'avère dans notre cas trop gourmande en encombrement mémoire [DG97].

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux algorithmes de commande optimale exacts. Examinons-les de plus près.

7.2.1 Calcul variationnel

Certains auteurs utilisent le calcul variationnel directement, ou à travers sa descendance directe pour la commande optimale, c'est-à-dire le théorème du maximum de Pontryaguine [Cul94] (voir annexe G p.185) :

- ▷ Dans [Del02], S. Delprat applique le calcul variationnel à la commande optimale d'un véhicule hybride parallèle double arbre, un embrayage (architecture d'un prototype construit au LAMIH). Cela impose d'approximer les cartographies des moteurs via des morceaux de paraboles. La prise en compte de l'équation d'état du système implique l'introduction d'un multiplicateur de Lagrange donnant après calcul un paramètre scalaire $\lambda(0)$ représentant la propension de la commande à charger ou décharger la batterie sur le cycle envisagé. Les résultats restent optimaux, mais pour un état de charge final qui n'est pas strictement maîtrisé. L'iso état de charge est donc obtenu par dichotomie sur $\lambda(0)$. L'algorithme en question est modifié pour pouvoir être utilisé en ligne via la régulation de $\lambda(0)$ ($\lambda-$control). S. Delprat étudie d'autres stratégies de commande instantanées que nous décrirons dans le chapitre 11 p.115 ;
- ▷ Dans [Dub02], A. Dubray applique le principe du maximum de Pontryaguine au cas d'un bus hybride série. Pour un cycle donné, une cartographie est obtenue, donnant la valeur optimale

[43] Notons que ces méthodes ne peuvent bien entendu être considérées comme exactes qu'à la précision du modèle près. Si l'on pouvait disposer d'un modèle très précis du système, rien ne dit que cet optimum global serait le même et atteint avec la même suite de commandes.

de la puissance de la génératrice électrique pour une puissance demandée à la roue et une valeur d'un scalaire jouant un rôle analogue au $\lambda(0)$ précédemment évoqué.
Considérant que les trajets d'un bus sont en théorie répétitifs, il est intéressant de pouvoir utiliser en temps réel (i.e. en ligne) les profils d'état de charge optimaux obtenus hors ligne (via le théorème de Pontryaguine). Le fonctionnement du bus est régulé avec un correcteur de type proportionnel-intégral de manière à ce que l'état de charge de sa batterie suive le profil optimal souhaité. Ici l'application en ligne des résultats hors ligne est possible du fait de l'application particulière de type transports en commun ;

▷ Dans [ZCC03] est présenté un travail semblable aux deux précédents pour une architecture parallèle à dérivation de puissance de type Prius. Les auteurs utilisent de plus la théorie des systèmes dynamiques hybrides.

Les auteurs de [ZCC03] introduisent un certain nombre d'états possibles pour leur véhicule (arrêt, flux série, boost, décollage du véhicule, récupération au freinage) dans un graphe orienté dont les sommets représentent ces divers états et les arcs les conditions à vérifier pour passer d'un état à un autre. L'optimisation globale est réalisée en tenant compte de ces conditions. Cela restreint néanmoins le champ de l'optimisation, car certaines règles qui sont imposées pourraient être un résultat de celle-ci (ex : à faible vitesse véhicule, le décollage est réalisé préférentiellement en tout électrique).

Dans la formulation du problème établie dans le chapitre 6 p.71, nous avons également décrit les divers états possibles pour le système véhicule dans le tableau 6.1 p.74. Néanmoins, nous n'avons pas défini les transitions pour passer d'un état à l'autre. Cela entraîne que plusieurs états peuvent être possibles simultanément. C'est l'algorithme d'optimisation globale qui va décider du bien-fondé d'un état ou d'un autre.

Pour résumer, les avantages du calcul variationnel sont la rapidité de calcul et le faible encombrement mémoire. Cependant, la résolution du problème est plus ou moins simple suivant le problème considéré. Par exemple, dans le cas de l'hybride parallèle, la résolution demande plus d'artifices de calcul que dans le cas de l'hybride série.

7.2.2 Programmation dynamique

D'autres auteurs utilisent la programmation dynamique via l'équation de Hamilton-Bellman-Jacobi (que nous décrivons dans le paragraphe suivant) :

▷ dans [RDC99], S. Rimaux l'applique à un hybride parallèle un embrayage avec moteur électrique côté moteur thermique, ainsi que P. Boucharel dans [Bou02] ;

▷ N. Venot dans [Ven01], qui déduit une cartographie de seuils de démarrage du moteur thermique applicable en ligne, pour un véhicule hybride parallèle un embrayage avec moteur électrique sur le primaire de la boîte de vitesses.

7.3 Principe de la programmation dynamique

7.3.1 Position du problème

La programmation dynamique prend son sens lorsqu'on considère le problème de la commande optimale d'un système (évoqué dans l'annexe G p.185)[44]. Il s'agit d'amener un système régi par une équation d'état $\dot{x} = f(x(t), u(t), t)$ d'un état A à un état B sous un certain nombre de contraintes. Nous nous intéresserons au cas discret, où l'équation d'état s'écrit $x(t+1) = f(x(t), u(t), t)$.

À chaque instant, il est possible de choisir $u(t)$ parmi l'ensemble des commandes admissibles afin de faire évoluer le système d'un état $x(0)$ à un état $x(T)$. Notons que l'état initial $x(0)$, final $x(T)$, et l'horizon T peuvent ne pas être fixés et donc faire partie intégrante du problème. Il est aussi possible d'introduire un coût final.

La connaissance de $x(0)$ et de l'ensemble des commandes $u(t)$ pour $t \leq k$ suffit à connaître les états successifs du système $x(0), \ldots, x(k+1)$. L'idée est de choisir la suite des commandes de manière à minimiser un critère de coût sur la trajectoire :

$$J(u) = \sum_{t=0}^{T-1} g(x(t), u(t), t)$$

Avec g une fonction de coût instantané. Si $x(0)$ est fixé, le problème de minimisation revient à choisir la succession des commandes u de manière à minimiser $J(u)$:

$$u^\star = \arg \min_{u(0),\ldots,u(T-1)} J(u)$$

Nous allons pouvoir déterminer $u^\star$ grâce à l'équation de Hamilton-Bellman-Jacobi présentée dans le paragraphe suivant.

7.3.2 Équation de Hamilton-Bellman-Jacobi

Le PRINCIPE D'OPTIMALITÉ DE BELLMAN est à la base de l'équation de Hamilton-Bellman-Jacobi (HBJ). Voici l'énoncé, tel que présenté par J.-C. Culioli dans [Cul94] : « *Dans un processus d'optimisation dynamique, une suite de décisions est optimale si, quels que soient l'état et l'instant considérés sur la trajectoire qui lui est associée, les décisions ultérieures constituent une suite optimale de décisions pour le sous-problème dynamique ayant cet état et cet instant comme conditions initiales.* ».

Exprimons sous une forme différente la valeur du critère $J(u)$ pour $u^\star$ exprimé au paragraphe précédent :

$$J(u^\star) = J^\star = \min_{u(0),\ldots,u(T-1)} \sum_{t=0}^{T-1} g(x(t), u(t), t)$$

$$J(u^\star) = \min_{u(0),\ldots,u(T-1)} \left[g(x(0), u(0), 0) + \sum_{t=1}^{T-1} g(x(t), u(t), t) \right]$$

On peut alors remarquer que :

[44] Le terme « dynamique » vient du fait qu'on s'intéresse à la dynamique d'un système en évolution [Cul03a]. Le terme a été utilisé pour la première fois par Richard Bellman au début des années 1950.

▷ d'une part, la minimisation par rapport aux variables $u(1), \ldots, u(T-1)$ ne concerne pas le premier terme $g(x(0), u(0), 0)$, du fait de la *séparabilité en temps du critère.*

▷ d'autre part, la somme des deux termes est minimum si, quel que soit l'état résultant de l'application de $u(0)$, les décisions ultérieures constituent une suite optimale de décisions pour le sous-problème dynamique ayant cet état et cet instant comme conditions initiales (application du principe d'optimalité).

On obtient donc :

$$J(u^\star) = \min_{u(0)} \left[g(x(0), u(0), 0) + \min_{u(1),\ldots,u(T-1)} \sum_{t=1}^{T-1} g(x(t), u(t), t) \right]$$

Le deuxième terme correspond au minimum du critère entre le point $x(1) = f(x(0), u(0), 0)$ (résultant de l'application de la commande $u(0)$ entre les temps $t = 0$ et $t = 1$) et le point $x(T)$, pour l'ensemble des $u(0)$ possibles. En appliquant la même décomposition au second terme, on arrive *par récursivité* à une somme de T termes. La procédure de résolution consiste à partir du terme le plus à droite, en se dirigeant vers les termes les plus à gauche (de manière rétrochrone). Ceci est l'équation de HBJ. On peut l'écrire de manière plus compacte et formelle, en posant :

$$V(y, \tau) = \min_{u(\tau),\ldots,u(T-1)} \left[\sum_{t=\tau}^{T-1} g(x(t), u(t), t) \,|\, x(\tau) = y \right]$$

[45]

On obtient alors :

$$V(y, \tau) = \min_{v} \left[g(y, v, \tau) + V(f(y, v, \tau), \tau + 1) \right]$$

La séparabilité en temps du critère $J(u)$ entraîne que l'écriture de HBJ en temps direct pourrait tout aussi bien être établie en temps indirect. Dans le même ordre d'idée, notons que l'aspect séquentiel dû au temps pourrait être introduit artificiellement dans un autre type de problème (par exemple en considérant un certain nombre de variables les unes après les autres).

Contrairement aux commandes fournies par le calcul variationnel et le théorème du maximum de Pontryaguine, la programmation dynamique permet de calculer une commande par nature en boucle fermée. En effet, à chaque instant, la série de commandes à appliquer dans le futur dépend directement de l'état courant.

Une application de HBJ est par exemple l'équation matricielle de Ricatti, dans le cas multivariables.

7.4 Application au problème d'optimisation globale considéré

7.4.1 Problème de la complexité

[Cul94] met en garde contre les problèmes de complexité importante lorsqu'on veut résoudre des problèmes de commande optimale via la programmation dynamique. Cette complexité est d'autant plus grande que la dimension du vecteur de commande est importante. Par exemple, si

[45] i.e. minimisation de la somme $\sum_{t=\tau}^{T-1} g(x(t), u(t), t)$ sous la contrainte $x(\tau) = y$.

le problème comprend 10 valeurs temporelles (ou assimilées, par un artifice), et si le problème comprend 4 grandeurs de commande pouvant prendre par discrétisation 100 valeurs différentes, le problème revient à calculer et éventuellement stocker $10 \cdot 100^4 = 10^9$ valeurs $V(x,t)$, ce qui peut s'avérer prohibitif en terme de temps de calcul et de capacité mémoire.

Qu'en est-il pour notre problème, posé dans le chapitre 6 ? Selon [Del02], l'explosion combinatoire est a priori inévitable. Voyons ce qu'il en est. Nous avons vu que l'on dispose de quatre variables de commande :

- ▷ le couple moteur électrique Γ_{ME} ;
- ▷ le rapport de boîte r_{BV} ;
- ▷ les états des embrayages r_{EMB_1} et r_{EMB_2}.

Une première simplification découle du fait que les variables r_{BV}, r_{EMB_1} et r_{EMB_2} ne peuvent prendre qu'un nombre fini de valeurs, ce qui limite le nombre de possibilités à chaque instant :

- ▷ au maximum cinq états du couple (r_{EMB_1}, r_{EMB_2}) sont possibles, décrits dans le tableau 6.1 p.74 ;
- ▷ dans le cas d'une boîte de vitesse conventionnelle à cinq rapports, r_{BV} peut prendre les valeurs 0 à 5.

De plus, ce nombre de possibilités pour (r_{EMB_1}, r_{EMB_2}) et r_{BV} pourra être plus ou moins important suivant les valeurs de vitesse et de couple à la roue Ω_R et Γ_R[46].

Une deuxième simplification est réalisée grâce à l'optimisation instantanée des rapports et de l'état des embrayages : pour une commande Γ_{ME} considérée, le rapport et l'état des embrayages sont choisis de manière à minimiser la consommation de carburant. Ainsi l'optimisation n'est globale sur le cycle que par rapport à la commande Γ_{ME}. Cette hypothèse a été également effectuée par S. Delprat dans [Del02].

Une autre hypothèse permet de faciliter la mise en oeuvre informatique, il s'agit du modèle de batterie dont les caractéristiques ne dépendent pas de l'état de charge. Nous reviendrons sur ce point en §9.5 p.93.

La méthode de HBJ est adaptée à notre problème du véhicule hybride, car :

- ▷ elle permet de résoudre des problèmes non différentiables ;
- ▷ elle permet de résoudre des problèmes hybrides ;
- ▷ le calcul de l'optimum global est garanti (procédé non itératif).

Les avantages par rapport au calcul variationnel sont :

- ▷ la non-nécessité d'exprimer le problème intégralement sous forme analytique ;
- ▷ le contrôle des conditions initiales et finales de la variable d'état ;

Les inconvénients sont par contre le temps de calcul et l'encombrement mémoire, ce dernier étant un facteur limitant. Néanmoins, pour les cycles de conduite généralement utilisés[47], ce problème n'est pas apparu.

[46] Par exemple, à faible vitesse véhicule, le rapport de cinquième n'est évidemment pas possible.
[47] De durée égale au maximum à environ 2000 s, e.g. le cycle INRETS HYZEM autoroutier.

7.4.2 Résolution de l'équation HBJ : théorie des graphes et algorithme de Ford

7.4.2.1 Bref rappel sur la théorie des graphes[48]

Un usage commun est de joindre des points tracés sur un papier par des traits qui représentent des relations entre ces points. Selon cette idée, un graphe est constitué d'un ensemble de points et d'une application Λ de cet ensemble de points dans lui-même. Ainsi, un point M est lié à tous les points de $\Lambda(M)$. Il est fréquent de distinguer deux types de graphe : orienté ou non-orienté. Le concept qui nous intéresse ici est orienté. Nous nommons les points mentionnés précédemment « sommets » et les traits « arcs orientés ». Sur la figure 7.1, $\Lambda(M)$ ne comprend qu'un point.

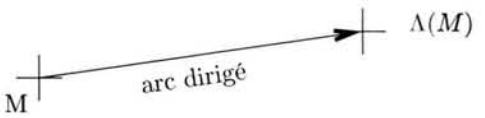


FIG. 7.1: *Concept de graphe orienté*

Il est possible d'introduire un coût relatif à chaque arc, et un poids à chaque sommet. Par exemple, si un sommet M a un poids $\lambda_M = 3$, et que l'arc orienté entre M et un sommet N de $\Lambda(M)$ a un coût de 5, alors N aura un poids égal à 8. Un problème commun est de trouver le chemin le moins coûteux pour aller d'un point à un autre dans un graphe. Même si le coût en question ne représente pas une distance, on dit par abus de langage « trouver le plus court chemin » dans un graphe.

7.4.2.2 Algorithme de Ford

Le problème de la recherche du plus court chemin peut être une application directe du principe de HBJ, dans la mesure où :

- ▷ à chaque point du graphe peut être associée une valeur quelconque, qui peut être la valeur d'état y du système considéré ;
- ▷ le passage d'un point M à un point de $\Lambda(M)$ correspond à l'application d'une commande adaptée, faisant nécessairement partie d'un espace de commandes admissibles correspondant, c'est-à-dire permettant ce passage. Cette commande a un coût connu ;
- ▷ un point d'arrivée étant fixé dans un graphe orienté, l'équation de HBJ permet de calculer $V(y, \tau)$ en tous les points du graphe. On affecte alors à chaque sommet la valeur de $V(y, \tau)$.

L'algorithme de Ford de recherche de plus court chemin présenté ci-après permet donc de résoudre HBJ de manière systématique, via une description intuitive puisque sous forme de graphe.

Décrivons l'algorithme de Ford pour la recherche du plus court chemin entre les sommets M_0 et M_n d'un graphe. Nous supposons que l'ensemble des coûts sont connus ; pour l'instant, nous ne considérons pas les valeurs d'état y correspondant aux divers points du graphe, mais seulement les valeurs de $V(y, \tau)$ aux points considérés. Pour la description de l'algorithme, il n'est pas nécessaire de considérer la variable temps.

[48] La théorie des graphes a fait l'objet d'une étude bibliographique, cf annexe L p.195.

1. *Initialisation* : chaque sommet $M_i(0 < i \leq n)$ du graphe reçoit un poids $\lambda_i = +\infty$. Le point de départ M_0 reçoit $\lambda_0 = 0$;
2. *Itérations* : pour $j \in [0 \ldots n]$, tous les arcs de coût c_k allant de M_j à chaque point M_i du graphe $(0 < i \leq n)$ sont examinés. Si $\lambda_j + c_k < \lambda_i$, alors $\lambda_i = \lambda_j + c_k$. Ainsi, pour $0 < i \leq n$, λ_i diminue nécessairement. λ_0 reste égal à zéro ;
3. *Condition d'arrêt* : pour $j \in [0 \ldots n]$, quand tous les arcs allant de M_j à $M_i(0 < i \leq n)$ ont été examinés, λ_i représente le coût optimal pour aller de M_0 à M_i. En particulier, λ_n représente le coût optimal pour aller de M_0 à M_n. Avec les notations utilisées pour écrire l'équation de HBJ, on a donc $\lambda_i = V(M_i)$, $V(M_i)$ représentant cette fois-ci le coût optimal pour aller de M_i à M_0, dans le sens rétrochrone.

Afin de diminuer l'encombrement mémoire du graphe, il est possible de calculer le coût des arcs à la volée.

D'autre part, si le graphe jouit de certaines propriétés, en particulier si à chaque point du graphe correspond un temps entre 0 et T, il peut être possible de calculer les $m \geq 1$ chemins optimaux pour aller de M_0 à M_n.

Chapitre 8

Description de l'outil d'optimisation globale KOALA

Pour traiter la problématique d'optimisation de l'énergie et du dimensionnement des véhicules hybrides, un outil d'optimisation globale nommé KOALA a été développé dans le cadre de la thèse, son but étant de déterminer de manière systématique le potentiel de chaque architecture de véhicule hybride sur un cycle donné.

KOALA permet de résoudre le problème de la minimisation du carburant consommé par un VHTE sur un cycle donné (cf chapitre 6 p.71). Celui-ci est résolu via l'équation de HBJ, en utilisant l'algorithme de FORD présenté précédemment.

8.1 Changement du jeu de commandes du système pour le VHTE parallèle à deux embrayages

Nous avons vu dans le chapitre 6 p.71 que l'on dispose de quatre variables de commande :

- ▷ le couple moteur électrique Γ_{ME} ;
- ▷ le rapport de boîte r_{BV} ;
- ▷ les états des embrayages r_{EMB_1} et r_{EMB_2}.

Rappelons l'équation de conservation de la puissance électrique dans le véhicule (équation 6.7 p.75) :

$$(E_B - R_B \cdot I_B) \cdot I_B = \Gamma_{ME} \cdot \Omega_{ME} + Pe(\Omega_{ME}, \Gamma_{ME}) + P_{ACC}$$

I_B se déduit du choix des commandes. Or, l'état du système, qui est l'état de charge relatif SOC_r, dépend directement de I_B via l'équation d'état du système (équation 6.2 p.72) :

$$SOC_{r_{i+1}} = \begin{cases} SOC_{r_i} - I_{B_i} & \text{si } I_{B_i} \geq 0 \\ SOC_{r_i} - I_{B_i} \cdot \nu_B & \text{si } I_{B_i} < 0 \end{cases}$$

Pour contrôler l'état de charge, il est donc plus intéressant de commander le courant I_B que le couple du moteur électrique.

Nous avons vu qu'il était possible d'exprimer les pertes du moteur électrique et son convertisseur sous la forme $Pe(\Omega_{ME}, I_B)$, ce qui nous donnait (équation 5.2 p.68) :

$$(E_B - R_B \cdot I_B) \cdot I_B = \Gamma_{ME} \cdot \Omega_{ME} + Pe(\Omega_{ME}, I_B) + P_{ACC}$$

Ce qui nous permet de déduire à partir du choix d'un rapport de boîte r_{BV}, de courant I_B, et de l'état des embrayages r_{EMB_1} et r_{EMB_2} la valeur de Γ_{ME}. En effet, Ω_{ME} est obtenu via l'utilisation de l'équation 6.5 p.75 :

$$\Omega_{ME} = k_{CO} \cdot \eta_{\Omega_{CO}} \cdot \eta_{\Omega_{EMB_2}} \cdot k_{BV}(r_{BV}) \cdot \eta_{\Omega_{BV}} \cdot k_{DIFF} \cdot \eta_{\Omega_{DIFF}} \cdot \Omega_R$$

Puis on en déduit la valeur de Γ_{ME} correspondante :

$$\Gamma_{ME} = [(E_B - R_B \cdot I_B) \cdot I_B - P_{ACC} - Pe(\Omega_{ME}, I_B)] \cdot \Omega_{ME}^{-1}$$

Puisqu'il est plus facile de commander l'état de charge de la batterie via I_B que Γ_{ME}, et que la connaissance du premier permet de calculer le second, nous prendrons désormais comme variables de commande du système : I_B, r_{BV}, r_{EMB_1}, r_{EMB_2}.

8.2 Problème de causalité et cartographie du moteur électrique

Le paragraphe précédent nous amène à la remarque suivante. Rappelons l'expression du rendement en vitesse et en couple de la courroie intégrée au VHTE considéré :

$$\eta_{\Omega_{CO}} = \eta_{\Gamma_{CO}} = \begin{cases} \sqrt{\eta_{P_{CO}}}^{-1} & \text{si } \Gamma_{ME} > 0 \\ \sqrt{\eta_{P_{CO}}} & \text{sinon} \end{cases}$$

Celui-ci dépend donc du sens du transfert énergétique. Or, dans le paragraphe précédent, nous avons montré la nécessité de connaître $\eta_{\Omega_{CO}}$ pour calculer Ω_{ME}, et ce, avant de calculer Γ_{ME}. Ceci pose un problème puisque la valeur de $\eta_{\Omega_{CO}}$ dépend de Γ_{ME}. Ce problème de causalité provient de la simplicité de cette modélisation ; il faudrait tenir compte de la dynamique de la courroie, ce qui n'est pas possible dans une optimisation globale. Un moyen de le contourner est de considérer que le sens du flux énergétique est directement donné par le signe du courant de la batterie I_B (le courant absorbé par les accessoires étant retranché). En réalité, ceci n'est pas forcément vérifié, du fait de l'équation de conservation de la puissance 5.2 p.68 : il est possible d'obtenir un courant batterie positif et un couple négatif au niveau du moteur électrique, à cause des pertes qu'il faut compenser à tout instant. Sachant que ceci représente un fonctionnement indésirable (décharge de la batterie pour un fonctionnement en frein), une opération de troncature de la cartographie du moteur électrique est effectuée de manière à éliminer les points correspondant à $I_B > 0$ et $\Gamma_{ME} < 0$.

8.3 Application de la méthode des graphes pour la résolution du problème d'optimisation globale

Un cycle vitesse-temps, un dimensionnement, et une puissance des accessoires sont fixés. Un état de charge batterie initial $SOC_r(t = 0)$ et un état de charge final $SOC_r(t = n \cdot T_e)$ sont donnés.

À chaque temps $i \cdot T_e$, des courants limites de recharge et décharge sont calculés, tenant compte des diverses contraintes évoquées plus haut lors de la formulation du problème d'optimisation globale. Ils seront en particulier fortement dépendants de l'équation de conservation de puissance dans la transmission, c'est-à-dire du cycle de conduite. Ces courants sont intégrés pour correspondre à des courbes limites de SOC_r entre $t = 0$ et $i \cdot T_e$. Ces limites sont gardées en mémoire, et ont deux usages :

- ▷ reportées dans le plan temps/état de charge (figure 8.1), à partir du point de départ ($t = 0, SOC_r(t = 0)$) et du point de fin ($t = T, SOC_r(t = T)$), elles permettent de délimiter une zone de SOC_r atteignable par le système ;
- ▷ à chaque instant, on sait que le courant batterie sera compris entre les valeurs de courant sur ces limites. En terme géométrique, cela équivaut à dire que la pente d'une courbe d'état de charge sera forcément comprise entre les pentes de ces deux limites. La figure 8.2 illustre un exemple considérant quatre arcs dans le plan temps/état de charge, correspondant à quatre courant batterie, et aussi à quatre consommation au niveau du moteur thermique (c_1, c_2, c_3, c_4). Nous avons $c_1 > c_2 > c_3 > c_4$, parce que plus un arc tend à recharger la batterie, plus le moteur thermique sera sollicité pour fournir de la puissance. Cependant, nous pourrions rencontrer un cas plus complexe, comme illustré ci-après :

$$\begin{cases} c_1 > c_2 > 0 \\ c_3 = c_4 = 0 \end{cases}$$

  Ce cas pourrait intervenir si Γ_R était négatif et suffisant pour recharger la batterie dans une quantité correspondant à l'arc c_3. Alors c_4 correspondrait à une stratégie (non-judicieuse) consistant à limiter le couple de récupération du moteur électrique et fournir le reste de couple négatif avec les freins mécaniques. Bien entendu, la solution optimale attendue passera par c_3, et non c_4. Les arcs c_1 et c_2 correspondraient à l'utilisation du moteur thermique pour accroître la charge batterie procurée par le freinage récupératif (flux série et freinage récupératif simultanés).

Le domaine d'état de charge est maillé de la courbe de charge maximum vers la courbe de décharge maximum, à intervalle régulier T_{SOC}, pour chaque temps $i \cdot T_e$ (figure 8.2). T_{SOC} est adapté pour correspondre à quelque pour cents de la puissance électrique embarquée, et constitue une variable qui conditionne la précision des résultats (comme nous le verrons en §9.2 p.91). À chaque point, on obtient un éventail de possibilités de courant batterie, dont l'ouverture est limitée par les pentes des courbes de décharge et recharge maximum qui ont servi à délimiter le graphe.

L'éventail réellement utilisé (sur la figure 8.2, les arcs de coût c_1, c_2, c_3, c_4) ne contient pas toujours le courant maximum de décharge (ici c'est le cas : « arc non pris en compte »), parce que le dernier point qui pourrait être considéré ne correspond pas à un point du maillage (un maillage non régulier amènerait à une explosion combinatoire). Donc sur cet exemple le courant de décharge maximum ne sera pas pris en compte lors de la recherche du chemin le plus court avec l'algorithme de Ford. L'erreur générée est inférieure à T_{SOC}, et donc l'erreur de puissance correspondante est plus faible que la précision en puissance du graphe. Cela pourrait changer les résultats si cette précision n'était pas assez grande[49]. Nous aborderons ce point en §9.2 p.91.

Nous obtenons ainsi un graphe orienté par la flèche du temps. Il reste à lui appliquer l'algorithme de Ford. Les poids des sommets sont calculés en chiffrant les coûts associés à chaque arc entre

[49] Dans le cas où cet arc a une signification particulière (par exemple, mode tout électrique), nous utilisons un artifice de calcul qui permet de le prendre en compte.

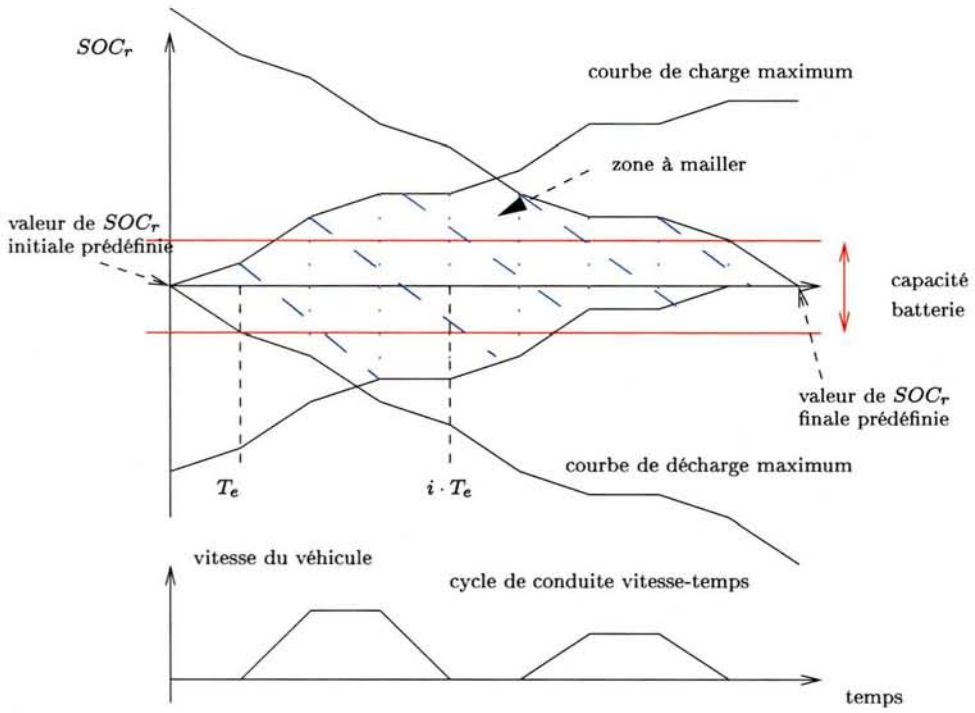


FIG. 8.1: *Cycle de conduite et limites d'état de charge relatif SOC_r correspondantes (schéma de principe)*

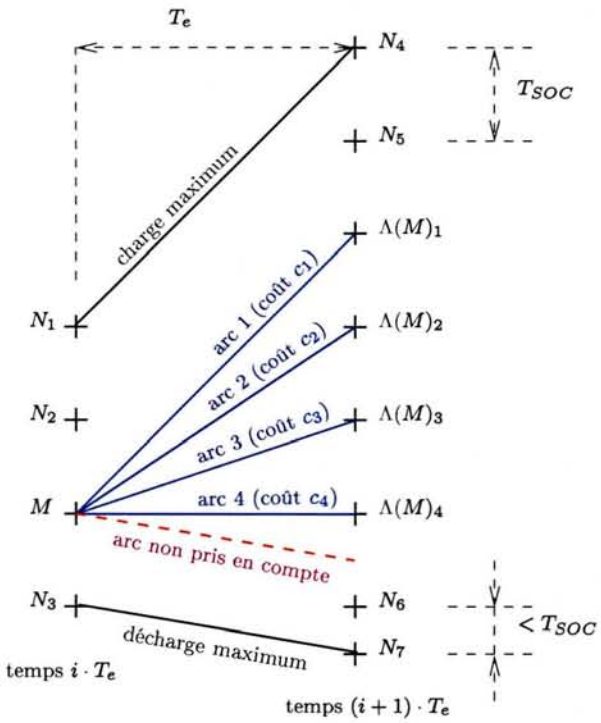


FIG. 8.2: *Éventail de possibilités de courant batterie I_B à chaque instant (schéma de principe)*

les sommets. Quand tous les sommets on un poids optimum, c'est-à-dire que la condition d'arrêt de l'algorithme de Ford est respectée, le chemin optimal d'état de charge est calculé à partir du point $(t = T, SOC_r(t = T))$, vers les temps négatifs.

8.4 Architectures modélisées par l'algorithme d'optimisation globale KOALA

Voici les architectures qui ont été codées dans KOALA lors du travail de thèse :

- ▷ VHTE hybride parallèle à un embrayage côté moteur thermique (figure 2.5 p.29) ;
- ▷ VHTE hybride parallèle deux embrayages (figure 2.9 p.32) ;
- ▷ VHTE idéal. Ce véhicule correspond à un découplage parfait entre le moteur thermique, le moteur électrique et la roue, ce qui signifie que les machines peuvent travailler sur leurs courbes de puissance optimale. Ce découplage peut être imaginé comme réalisé par deux transmissions à variation continue parfaite, c'est-à-dire de rendement unitaire et de rapport de réduction pouvant varier entre 0 et $+\infty$ (figure 8.3). Ce véhicule permet de définir le minimum de consommation qu'il serait possible d'atteindre en faisant varier l'architecture hybride du véhicule et en travaillant à stratégie de gestion optimale (ce qui serait impossible dans la réalité) ;

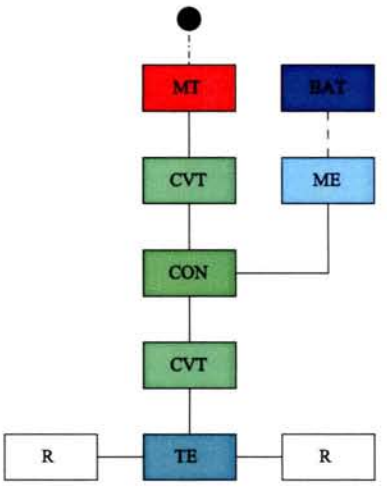


FIG. 8.3: *Synoptique du VHTE idéal*

- ▷ véhicule thermique conventionnel ;
- ▷ véhicule thermique conventionnel idéal. Ce véhicule est l'analogue du VHTE parfait pour les véhicules conventionnels. Le découplage entre la roue et le moteur thermique peut être représenté par une CVT idéale (figure 8.4).

D'autres architectures ont été codées dans KOALA, dans le cadre d'une étude paramétrique dont quelques résultats sont donnés en chapitre 10 p.103 [DRST+04] :

- ▷ VHTE série (figure 2.4 p.27) ;
- ▷ diesel électrique (i.e. hybride série sans batterie) ;

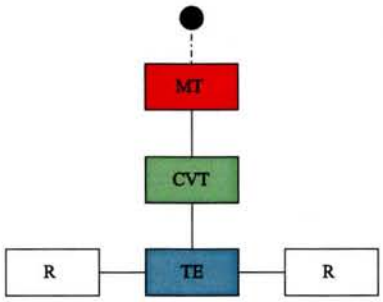


FIG. 8.4: *Synoptique du véhicule thermique conventionnel idéal*

▷ VHTE de type parallèle à dérivation de puissance, avec train épicycloïdal (à l'image de la Toyota Prius). Ce véhicule comprend donc deux machines électriques comme le VHTE série (figure 2.10 p.33).

Chapitre 9

Résultats d'optimisation globale

9.1 Architecture choisie, hypothèses pour l'établissement des résultats

L'architecture qui a été choisie pour ce chapitre est l'hybride parallèle à deux embrayages, tout comme lors de la formulation du problème d'optimisation globale en 6 p.71. Le véhicule de référence est la Clio 1,5L dCi. Sauf mention du contraire, on choisit :

- ▷ moteur thermique de la Clio 1,5 dCi de puissance maximum 52 kW ;
- ▷ moteur électrique Valeo Mars de puissance maximum 9,2 kW en traction, 12.4 kW en récupération ;
- ▷ puissance accessoires $P_{ACC} = 150\,\mathrm{W}$;
- ▷ batterie Exide de tension à vide $E_B = 37.6\,\mathrm{V}$, résistance interne $R_B = 0.01\,\Omega$, capacité nominale $C_B = 40\,\mathrm{A}\cdot\mathrm{h}$, rendement faradique $\nu_B = 0,9$, courant maximum $I_{B_{max}} = 300\,\mathrm{A}$et minimum $I_{B_{min}} = -210\,\mathrm{A}$;
- ▷ $k_{\Gamma_{BV}} \cdot k_{\Gamma_{DIFF}} = [12,3; 6,7; 4,4; 3,2; 2,5]$ et $\eta_{\Gamma_{BV}} \cdot \eta_{\Gamma_{DIFF}} = [0,87; 0,94; 0,95; 0,95; 0,95]$ pour les cinq rapports. $\eta_{\Omega_{BV}} \cdot \eta_{\Omega_{DIFF}} = 1$. $\eta_{P_{CO}} = 1$.

Nous choisissons de montrer les résultats sur le cycle normalisé européen afin de faciliter leur analyse. Toutes les consommations annoncées sont à $\Delta SOC_r = 0$ entre le début et la fin du cycle NEDC.

9.2 Validation des résultats : influence de T_{SOC} sur la consommation

Pour chaque valeur du pas en état de charge T_{SOC}, on définit une erreur relative en puissance, égale au rapport suivant :

$$\epsilon(T_{SOC}) = \frac{T_{SOC} \cdot E_B}{T_e \cdot P_{ME_{max}}}$$

Quand $\epsilon(T_{SOC})$ diminue, la consommation optimale sur un cycle, donnée par KOALA, converge asymptotiquement vers un minimum. Cela peut être observé sur la figure 9.1 pour trois puissances de moteur électrique différentes.

On peut remarquer que la consommation varie dans une relativement faible proportion lorsque $\epsilon(T_{SOC})$ est inférieur à 5%.

La convergence de la consommation à 3 kW est plus rapide qu'à 30 kW, parce qu'un moteur électrique de 30 kW permet beaucoup plus de possibilités quant à la baisse de consommation du véhicule, qu'un moteur électrique de 3 kW.

Dans la suite du mémoire, tous les résultats de KOALA seront donnés avec une précision $\epsilon(T_{SOC}) = 2\%$.

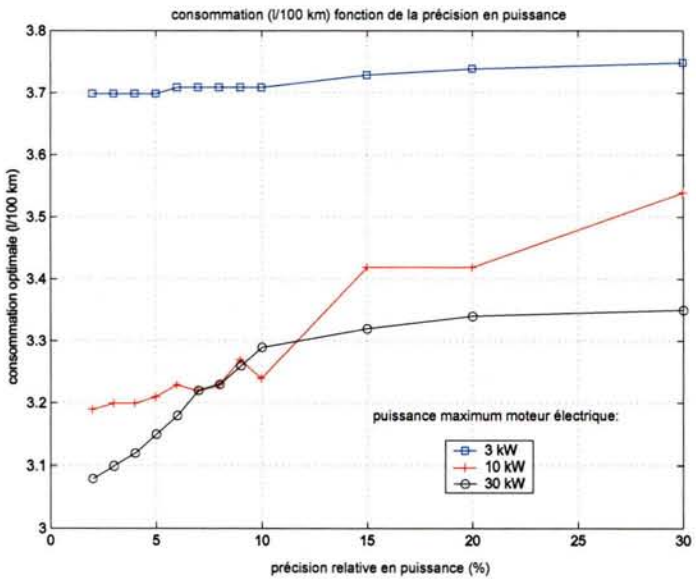


FIG. 9.1: *Convergence des résultats de consommation avec la valeur de* $\epsilon(T_{SOC})$

9.3 Temps de calcul

Le tableau 9.1 indique le temps de calcul [50] et le nombre de sommets dans le graphe pour une machine électrique de puissance égale à 10 kW. Les temps de calculs restent raisonnables, ce qui nous a permis de réaliser l'étude paramétrique présentée dans le chapitre 10 p.103.

$\epsilon(T_{SOC})$ (%)	30	20	10	5	2
millions de sommets	1.3	1.9	3.8	7.7	19.1
temps de calcul (s)	7	11	41	87	432

TAB. 9.1: *Temps de calcul et nombre de sommets selon la valeur de* $\epsilon(T_{SOC})$

[50] Sur un ordinateur muni d'un processeur pentium IV M, 1.8 GHz, 768 Mo RAM

9.4 Vérification du principe d'optimalité de Bellman

Sur la figure 9.2 nous avons représenté le profil d'état de charge optimal sur cycle NEDC avec départ à chaud[51], pour neuf différences d'état de charge relatif ΔSOC sur le cycle, échelonnées entre -40 et +40 %. Il apparaît que les chemins optimaux ont des allures similaires, et ne se coupent jamais, tout au moins dès $t = 200\,\mathrm{s}$.

Lorsque nous réalisons un agrandissement entre 0 et 80s (figure 9.3), on vérifie que les courbes ne se coupent pas non plus au début du cycle. En définitive, soit elles sont confondues, soit elles sont disjointes, mais elles ne se coupent jamais.

Ceci constitue une vérification du principe d'optimalité de Bellman énoncé en §7.3.2 p.80.

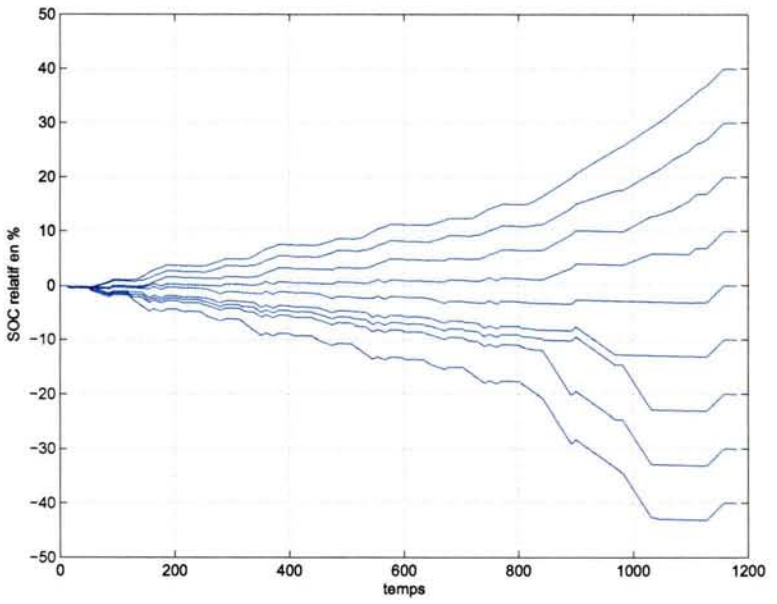


FIG. 9.2: *Chemins optimaux correspondant à des différences d'état de charge sur le cycle échelonnées entre -40 et +40%*

9.5 État de charge optimal sur le cycle de conduite NEDC

Le chemin optimal d'état de charge relatif est représenté sur la figure 9.4b, pour le cycle de vitesse NEDC (figure 9.4a).

Ce chemin optimum dérive vers des états plus déchargés de la batterie, puis retrouve sa valeur initiale suite à la récupération au freinage correspondant à la dernière décélération. Comme on peut le voir sur la figure 9.4c, un motif de SOC_r est associé à chaque créneau de vitesse véhicule, ce motif étant le même pour chaque type de créneau considéré. Chaque motif correspond à une allure de répartition de couple optimale entre le moteur thermique et électrique, pour le cycle donné. Entre les créneaux, c'est-à-dire à vitesse véhicule nulle, la décharge batterie est due au courant des accessoires.

[51] Pour une description du cycle NEDC, voir l'annexe E p.179.

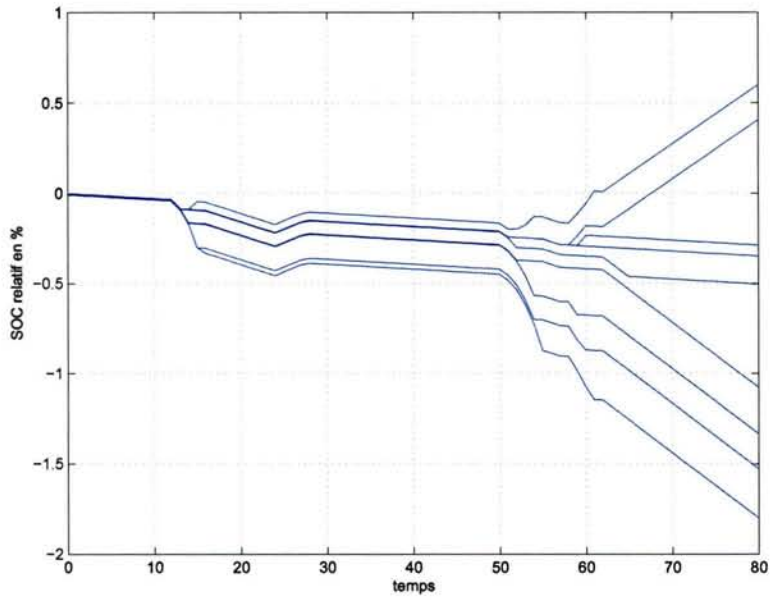


FIG. 9.3: *Agrandissement sur les chemins optimaux correspondant à des différences d'état de charge sur le cycle échelonnées entre -40 et +40%*

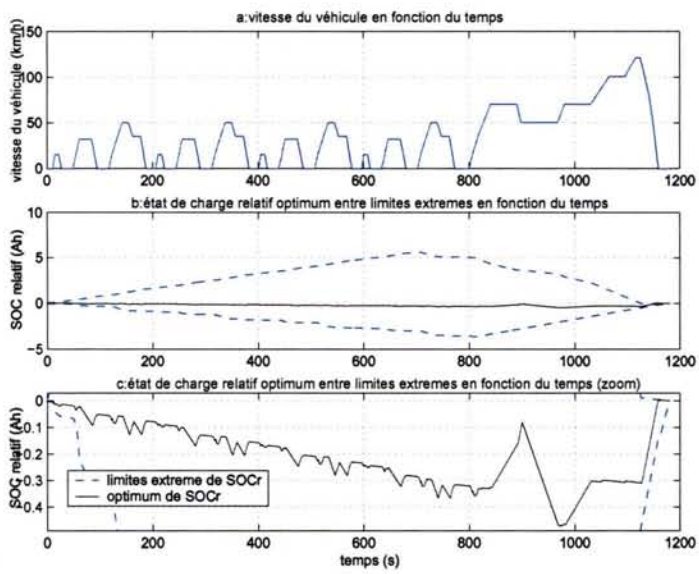


FIG. 9.4: *Chemin d'état de charge relatif optimum sur un cycle NEDC : vue globale et agrandissement*

Les valeurs d'état de charge sélectionnées par l'algorithme d'optimisation sont telles que la batterie n'est pas utilisée de manière profonde : la dérive maximum est inférieure à $0.5\,\mathrm{A}\cdot\mathrm{h}$, ce qui représente environ 1% de la capacité nominale de la batterie.

Ceci justifie, au moins pour ce véhicule et pour le cycle de vitesse européen, qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser dans l'optimisation globale des modèles tenant compte de l'état de charge, hypothèse que nous avions faite, mais pas justifiée, en §5.3.1 p.59.

En effet, les caractéristiques des batteries sont a priori telles que (e.g. figure 5.2 p.61) :

▷ plus la batterie est déchargée, plus la résistance interne augmente ;
▷ plus la batterie est déchargée, plus la tension à vide diminue ;

Ce qui entraîne que plus la batterie est déchargée, moins elle pourra être utilisée en décharge, donc le moteur électrique en traction. On peut donc en déduire que si le modèle de batterie utilisé pour l'optimisation tenait compte de l'état de charge, celle-ci aurait encore moins propension à se décharger. Par conséquent, on peut faire l'hypothèse que l'influence sur la consommation de la variation de E et R avec l'état de charge ne se ferait pas sentir, puisque sur la plage de faible amplitude considérée, ceux-ci peuvent être estimés constant. Néanmoins, cette hypothèse n'est a priori plus valable lorsqu'on considère un fonctionnement en charge depleting.

9.6 Couples optimaux sur le cycle NEDC

Sur la figure 9.5b, les couples des moteurs thermiques et électriques sont représentés, sur la partie urbaine du cycle NEDC (cycle ECE15). Le véhicule décolle en tout électrique au début de chacun des trois créneaux de vitesse considérés ; ensuite le moteur thermique démarre et le moteur électrique fonctionne en générateur dans une phase de flux série. Pendant les phases à vitesse stabilisée, le moteur thermique s'arrête, le véhicule est en mode tout électrique. Pendant la phase de décélération, le moteur thermique est arrêté, le moteur électrique réalise de la récupération au freinage. Si le couple minimum du moteur électrique est atteint, le complément est réalisé grâce aux freins mécaniques (non représenté ici).

9.7 Points de fonctionnement du moteur électrique et du moteur thermique sur cycle NEDC

9.7.1 Points de fonctionnement du moteur thermique dans sa cartographie

La majorité des moteurs thermiques possède une cartographie telle que les meilleurs rendements se situent à relativement faible régime et à fort couple, plutôt qu'à fort régime et faible couple (raisonnement à iso-puissance). Ceci peut être observé sur la figure 9.6, où les bulles d'iso-consommation spécifique sont représentées pour le moteur thermique de la Clio 1,5 dCi.

Il est donc légitime que KOALA choisisse de travailler dans ces zones à faible régime et fort couple, afin de minimiser la consommation de carburant sur le cycle (figure 9.6). Ceci est réalisé par le choix de rapports de boîte longs (figure 9.7).

Les deux points isolés vers 2000 à 3000 tr/min correspondent aux paliers à 100 et 120 km/h du cycle NEDC (figure 9.7) : le rapport de boîte utilisé est la cinquième, il n'est donc pas possible d'obtenir un régime moteur thermique plus faible.

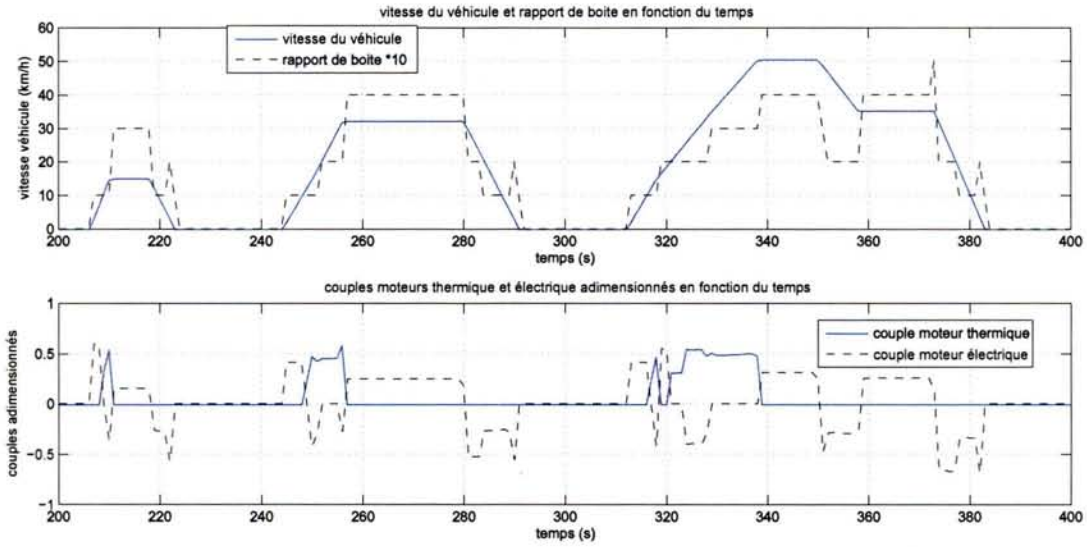


FIG. 9.5: *Allure des couples des moteurs thermiques et électriques sur la partie ECE15 du cycle NEDC*

On peut observer sur la figure 9.6 que le moteur thermique ne travaille jamais à couple négatif. Ceci est possible car l'architecture permet de débrayer et d'arrêter le moteur thermique si cela est nécessaire pour diminuer la consommation de carburant. Sur une architecture à un embrayage, ceci serait irréalisable.

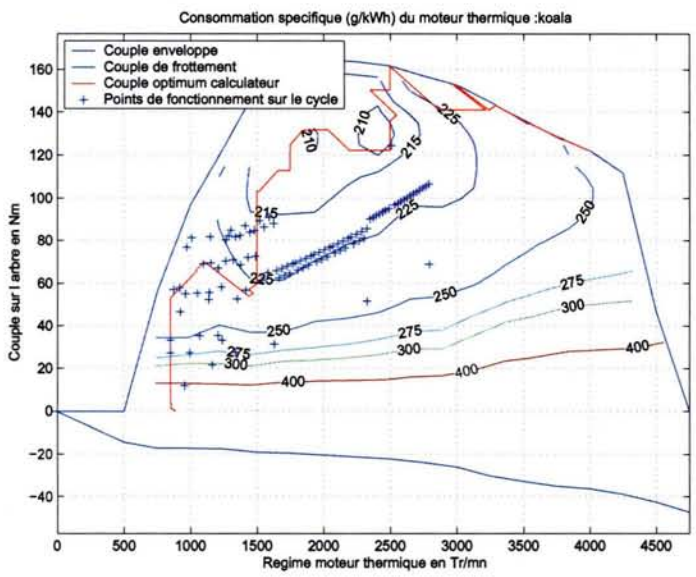


FIG. 9.6: *Points de fonctionnement optimum du moteur thermique sur le cycle NEDC, choisis par KOALA*

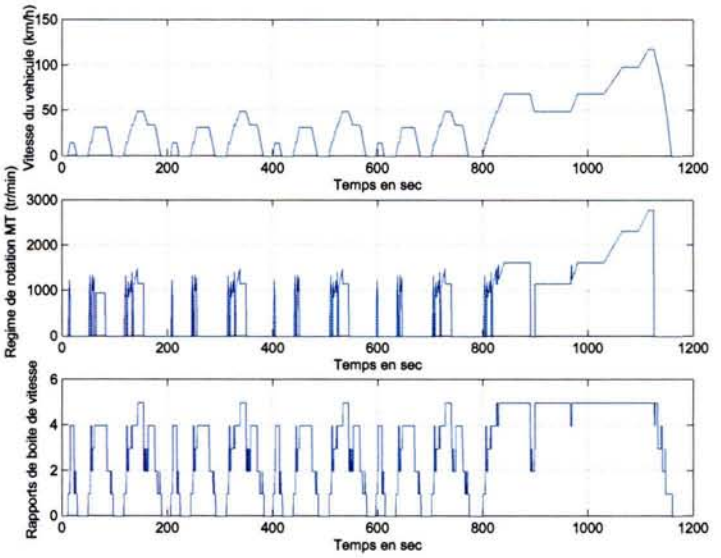


FIG. 9.7: *Régime du moteur thermique choisi par KOALA, en fonction du régime à la roue, sur le cycle NEDC*

9.7.2 Points de fonctionnement du moteur électrique dans sa cartographie

La figure 9.8 représente les points de fonctionnement du moteur électrique dans sa cartographie. On peut vérifier que celui-ci utilise plus son potentiel en récupération qu'en traction. À propos de la forme de la cartographie, notons :

- ▷ le pic dans le cadran de couple positif et vers le régime nul correspond aux capacités maximales du moteur en démarrage ;
- ▷ le creux à régime nul dans le cadran de couple négatif correspond à des points à rendement assez faible pour que le courant batterie servant à compenser les pertes de la machine rende la récupération inutile.

9.8 État de charge optimal sur un plus long cycle

Nous avons vu que les motifs d'état de charge relatif sont identiques sur un type de créneau de vitesse véhicule. Afin d'étudier l'influence de la longueur du cycle sur les motifs optimaux, concaténons la partie urbaine d'un deuxième cycle NEDC au premier.

Pour des raisons informatiques de limites de mémoire, nous avons réalisé ce calcul en tronquant le graphe à mailler à partir d'une certaine profondeur de décharge, ainsi que de recharge. En faisant varier cette valeur de troncature, il peut être vérifié qu'elle n'influe pas sur le résultat de l'optimisation.

Sur la figure 9.9b est représenté l'état de charge optimal sur le cycle NEDC allongé :

- ▷ la décharge maximum de la batterie est sensiblement la même que précédemment, c'est-à-dire faible (moins de 1% de la capacité batterie).

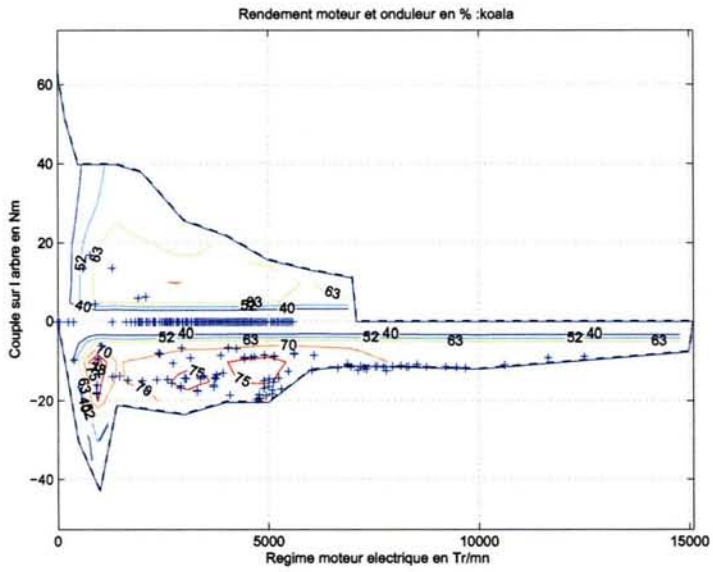


FIG. 9.8: *Points de fonctionnement optimum du moteur électrique sur le cycle NEDC, choisis par KOALA*

▷ les motifs de SOC_r pour la partie urbaine en début de cycle sont les mêmes qu'en fin de cycle, et quasiment les mêmes que ceux du cycle NEDC classique. La dérive en état de charge, égale à deux fois celle du cycle NEDC (du fait de deux parties urbaines dans le cycle) est compensée par une recharge batterie en flux série plus importante pendant le créneau à grande vitesse. Il semble que les petits créneaux forcent un comportement donné, alors que ceux à plus grande vitesse permettent plus de liberté.

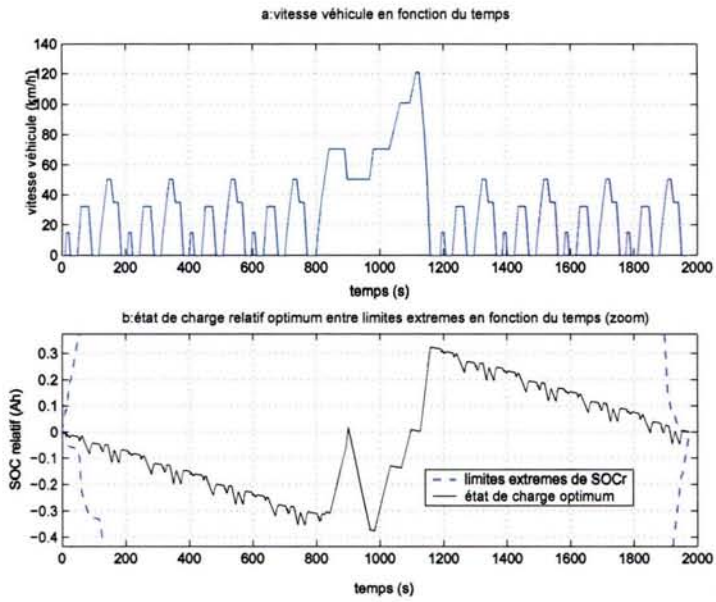


FIG. 9.9: *Chemin d'état de charge relatif optimum sur un cycle NEDC allongé*

9.9 Variation du chemin optimum en fonction des caractéristiques batterie

9.9.1 Variation de la résistance

Compte tenu de la chute de la puissance maximum de la batterie lorsque sa résistance augmente, nous limitons celle-ci à $0,05\,\Omega$, afin de ne pas limiter exagérément les possibilités du moteur électrique pour une tension à vide donnée. Sur la figure 9.10 est représentée l'évolution de l'état de charge optimal lorsque la résistance de batterie varie entre $10^{-6}\,\Omega$ et $5 \cdot 10^{-2}\,\Omega$, sur le cycle HYZEM Urbain. Nous pouvons constater les points suivants :

- ▷ plus la résistance batterie est élevée, plus le profil d'état de charge optimum reste proche du zéro relatif. L'optimisation globale a donc tendance à ne pas utiliser un système de stockage d'énergie réversible possédant un mauvais rendement énergétique ;
- ▷ la consommation de carburant s'élève à partir du moment où les pertes Joule deviennent non négligeables, et par conséquent un obstacle majeur à l'utilisation du moteur électrique.

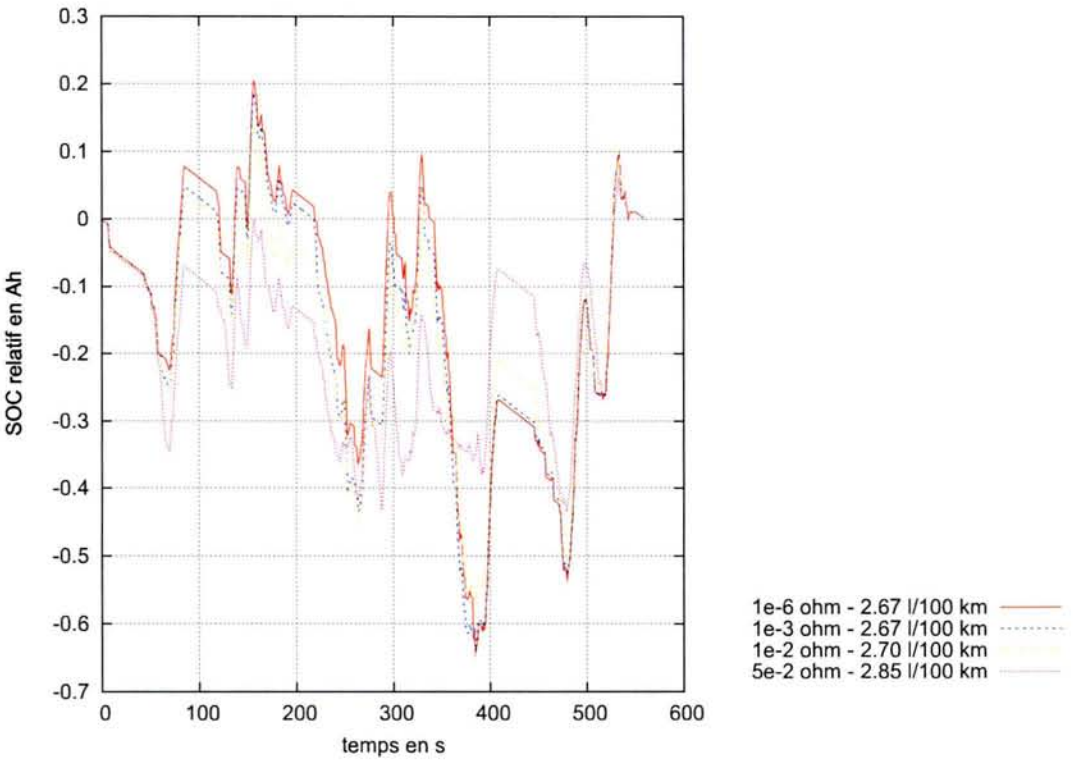


FIG. 9.10: *Variation du chemin optimal d'état de charge et de la consommation en fonction de la résistance batterie (cycle HYZEM Urbain)*

9.9.2 Variation du rendement faradique

Sur la figure 9.11 est représentée l'évolution de l'état de charge optimal pour quatre valeurs de rendement faradique, toujours sur le cycle HYZEM Urbain. Les conclusions sont les mêmes que dans le cas de la variation de la résistance batterie.

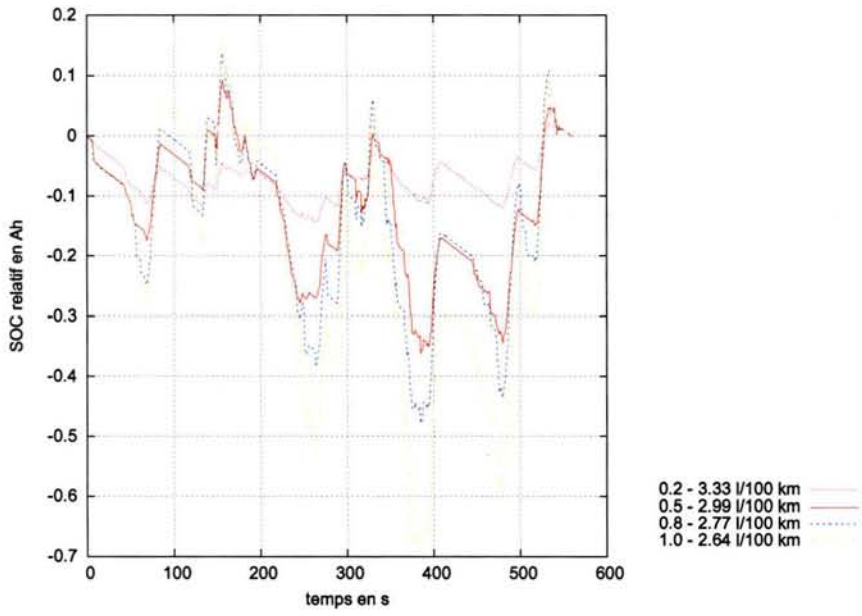


FIG. 9.11: *Variation du chemin optimal d'état de charge et de la consommation en fonction du rendement faradique de la batterie (cycle HYZEM Urbain)*

Les résultats instantanés de puissance des moteurs thermique et électrique montrent qu'alors il est intéressant de réaliser du décollage tout électrique et du mode tout électrique lorsque le rendement faradique est égal à 1, ce n'est plus le cas lorsqu'il est égal à 0.2 (figure 9.12 et 9.13).

9.10 Recherche des m meilleurs chemins dans le plan temps-état de charge

Comme il a été indiqué en §7.4.2.2 p.83, la phase de retour de l'algorithme de Ford a été codée de telle manière que celle-ci puisse garder en mémoire non pas le chemin optimal, mais les m meilleurs, à la précision du graphe prêt.

Sur la figure 9.14 sont représentés pour le cycle NEDC les cent meilleurs chemins dans le graphe. On peut constater qu'ils sont pratiquement confondus. De plus, les consommations correspondantes en l/100 km sont identiques à dix décimales derrière la virgule.

Cela s'explique du fait que le nombre de chemins différents dans le graphe est très important. En effet, si l'on suppose que les éventails de possibilités contiennent en moyenne 50 courants batterie différents (à $\epsilon(T_{SOC}) = 2\%$, ceci est proche de la réalité), pour le cycle NEDC qui dure 1181 s, cela fait de l'ordre de 50^{1181} chemins d'état de charge différents. Il n'est donc pas étonnant

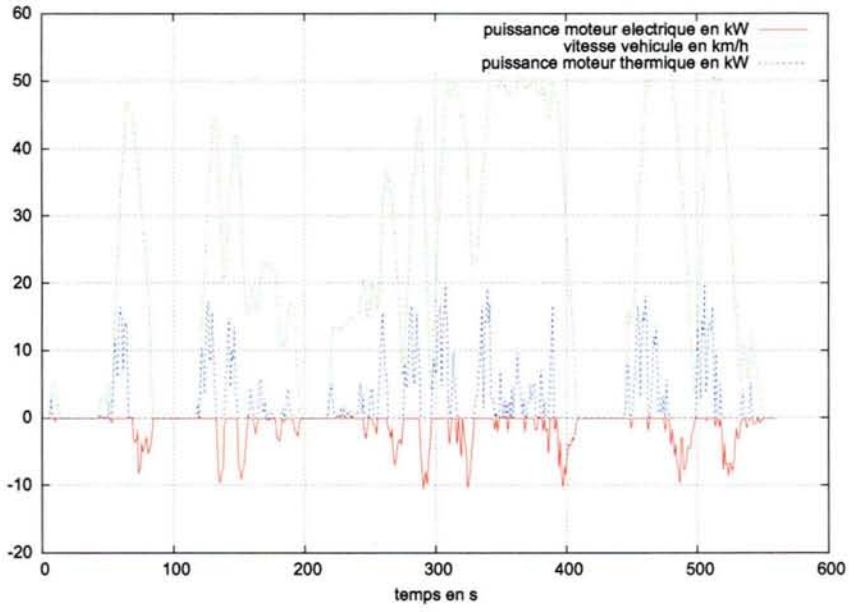


FIG. 9.12: *Puissances sur les moteurs thermique et électrique en fonction de la vitesse à la roue pour le cycle HYZEM Urbain (rendement faradique égal à 0.2)*

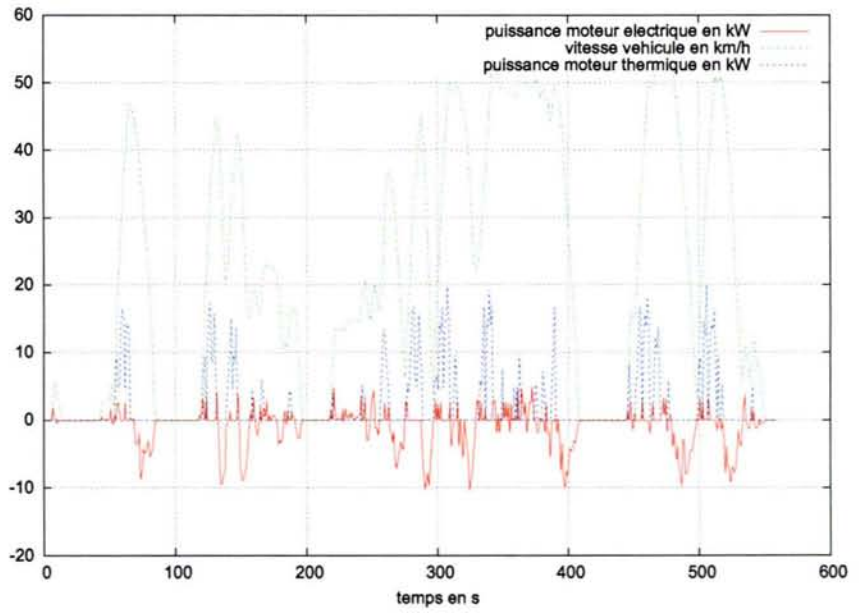


FIG. 9.13: *Puissances sur les moteurs thermique et électrique en fonction de la vitesse à la roue pour le cycle HYZEM Urbain (rendement faradique égal à 1)*

qu'il y en ait au moins cent qui soient équivalent d'un point de vue consommation, il en existe d'ailleurs une quantité d'autres.

Il est intéressant de se demander s'il existe des chemins relativement proches d'un point de vue consommation de carburant, mais assez éloignés du chemin optimal dans le plan temps/état de charge, pour être considérés comme significativement différents. Comme il n'est pas possible, pour des problèmes de mémoire machine, de conserver un grand nombre de chemins optimaux, une approche intéressante pourrait être de parcourir le graphe au hasard (néanmoins avec certaines règles pour limiter le temps de calcul), et de regarder l'évolution de la consommation par rapport à un critère de distance, définie par rapport au chemin optimum dans le plan temps/état de charge,

.

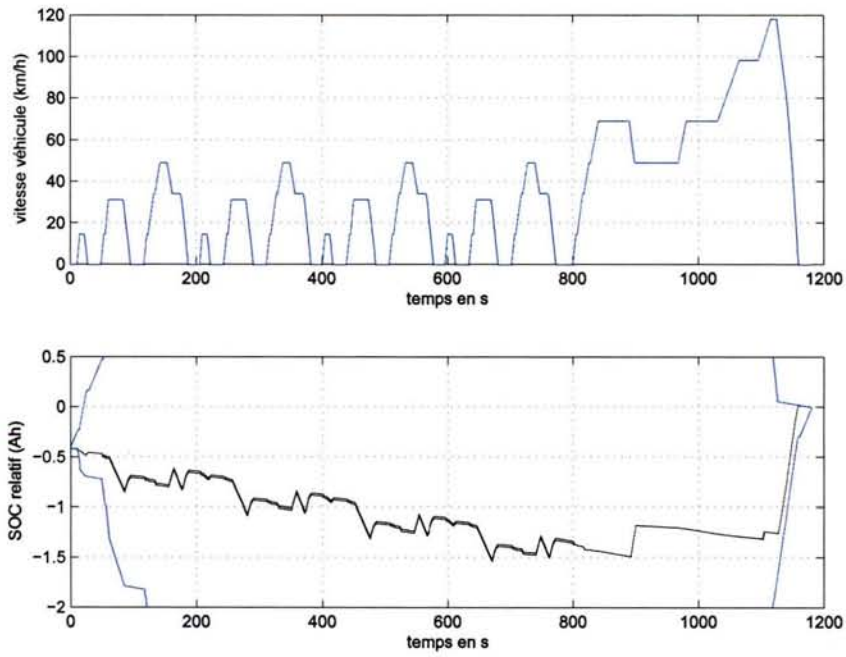


FIG. 9.14: *Cent meilleurs chemins dans le graphe temps/état de charge, pour le cycle de vitesse NEDC*

Chapitre 10

Étude paramétrique

En dehors des caractéristiques batterie, d'autres paramètres clé du véhicule hybride ont fait l'objet d'une étude de sensibilité par rapport au critère consommation de carburant, sur un cycle de conduite vitesse-temps donné. La comparaison des consommations ne pouvant être réalisée qu'entre véhicules ayant des performances dynamiques comparables, ceci a fait l'objet d'un travail en collaboration avec M. Desbois-Renaudin, il s'agit de l'étude paramétrique PARAVH dont la démarche est exposée en §10.1. Le lecteur pourra se référer à [DRST+04] pour plus de détails.

Ceci constitue donc une application de la démarche systématique dont la teneur a été formulée en §4.2 p.51.

La variation de trois paramètres a été étudiée :

- ▷ la puissance maximale du moteur électrique (paramètre représentatif de sa taille) ;
- ▷ le rendement maximum du moteur électrique et de son convertisseur (paramètre représentatif de sa technologie) ;
- ▷ la puissance des accessoires (e.g. effet de l'utilisation d'une climatisation sur la consommation de carburant).

Nous présentons ici les résultats pour le véhicule de référence Clio 1.5 l dCi. Tous les calculs sont réalisés sur le cycle normalisé européen (NEDC) avec départ à chaud. Les véhicules hybrides considérés sont des VHTE deux embrayages, sauf en §10.2 p.110, où l'on présentera des résultats de consommation optimum entre certaines architectures évoquées en §8.4 p.89.

10.1 Étude paramétrique : utilisation de KOALA

La valeur du paramètre considéré (puissance moteur électrique, rendement moteur électrique, ou puissance des accessoires) est symbolisé par la case « valeur paramètre » sur la figure 10.1.

Pour pouvoir comparer les consommations de véhicules différents, il est nécessaire :

- ▷ de considérer des véhicules ayant des performances dynamiques similaires ;
- ▷ de ne pas privilégier un véhicule par rapport à un autre, par exemple via le choix d'une loi de gestion d'énergie plus adaptée à l'un qu'à l'autre.

Le premier point impose la réalisation d'un dimensionnement des véhicules pour satisfaire un cahier des charges de performances dynamiques donné. Le deuxième point impose l'utilisation

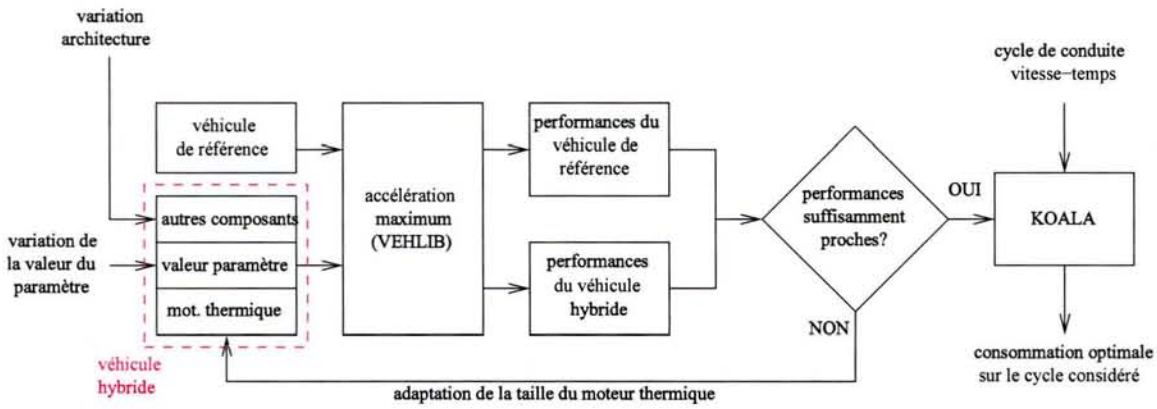


FIG. 10.1: *Procédure de dimensionnement du véhicule hybride*

d'un logiciel d'optimisation globale, qui permet de donner de manière *systématique* le potentiel d'un véhicule.

L'étude s'organise de la façon suivante (figure 10.1) :

1. Un véhicule thermique conventionnel de référence est choisi. Deux véhicules sont considérés :
   - ▷ Clio 1,5 l dCi (moteur K9K702) ;
   - ▷ Peugeot 306 HDI (moteur DW10TD).
2. Une architecture de véhicule hybride est choisie ;
3. Une valeur du paramètre à faire varier est fixée ;
4. Une taille (i.e. puissance maximum) de moteur électrique pour le véhicule hybride est choisie. Lorsque le paramètre considéré est la puissance du moteur électrique, elle est déjà choisie en étape 3 ;
5. Une puissance moyenne de demande des accessoires sur le réseau électrique de bord est fixée. Lorsque le paramètre considéré est la puissance des accessoires, elle est déjà choisie en étape 3 ;
6. La taille du moteur thermique du véhicule hybride est adaptée afin que son temps de montée en vitesse 0-100 km/h soit comparable (à 0,5% près) à celui du véhicule conventionnel de référence. Les performances sont estimées grâce à la bibliothèque de simulation VEHLIB ;
7. Lorsque ces performances sont comparables, un ou plusieurs cycles de conduite vitesse-temps sont choisis ;
8. La consommation optimale sur ces cycles est déterminée par l'algorithme d'optimisation globale KOALA.

Puis l'étude est reprise à l'étape 3 pour une autre valeur de paramètre. On obtient donc :

▷ pour des performances dynamiques données ;
▷ pour une architecture de véhicule hybride donné ;
▷ pour un cycle de conduite vitesse-temps et une puissance accessoires donnés ;

la variation de la consommation optimale du véhicule hybride sur le cycle considéré, par rapport à la variation du paramètre envisagée.

10.1.1 Puissance maximale du moteur électrique

Sur la figure 10.2 est représentée l'évolution de la consommation de carburant du véhicule hybride sur le cycle NEDC lorsque la puissance du moteur électrique varie. Ce graphe a pour ambition de détailler le gain de consommation apporté par chacun des différents aspects de l'hybridation, en partant du véhicule conventionnel de référence et en l'hybridant progressivement.

Ce graphe étant relativement complexe, nous commencerons par expliquer sa légende en §10.1.1.1, puis nous l'analyserons en §10.1.1.2.

10.1.1.1 Explication de la figure 10.2

Trois véhicules différents sont utilisés pour tracer le graphe (ceux-ci sont également détaillés dans la légende, voir figure 10.2) :

Le véhicule de référence Il s'agit du véhicule thermique de référence, en l'occurrence la Clio 1.5 l dCi. Les consommations correspondantes sont représentées par des points sur l'axe des ordonnées ; en effet, ce véhicule ne possède pas de moteur électrique participant à la motorisation. Trois valeurs de consommation correspondent à ce véhicule de référence :

- ▷ les rapports de boîte utilisés sont ceux d'un conducteur moyen (point jaune) ;
- ▷ le véhicule dispose en plus de la fonction start/stop (point orange) ;
- ▷ le véhicule dispose en plus de la fonction start/stop et de l'optimisation des rapports de boîte, ce qui est rendu possible via l'utilisation d'une boîte robotisée (point rose).

Véhicule conventionnel avec dimensionnement véhicule hybride Il s'agit des véhicules hybrides dimensionnés dans la procédure détaillée en §10.1, mais dont la chaîne de traction est utilisée comme sur un véhicule conventionnel, c'est-à-dire sans utiliser le moteur électrique et la batterie. Chaque puissance de moteur électrique implique un dimensionnement du moteur thermique différent. On distingue :

- ▷ une première zone (rouge sombre) indique le gain dû à l'apport de la fonction start/stop ;
- ▷ une deuxième zone (rose foncé) indique le gain de consommation dû à l'optimisation des rapports de boîte via l'utilisation d'une boîte robotisée.

Passage au véhicule hybride Le moteur électrique et la batterie du véhicule hybride dimensionné dans la procédure détaillée en §10.1 sont cette fois-ci utilisés, en respectant la contrainte de ΔSOC nul sur le cycle.

Pour recharger la batterie, deux possibilités sont offertes :

- ▷ réaliser du flux série ;
- ▷ faire de la récupération au freinage.

Afin de dissocier les gains associés à l'une et/ou l'autre de ces possibilités, KOALA permet de réaliser des optimisations où l'énergie électrique provient :

- ▷ du flux série, mais en limitant celui-ci à la quantité nécessaire pour compenser la puissance des accessoires, afin de réaliser un ΔSOC nul sur le cycle. Ceci nous permet de chiffrer le potentiel de gain en consommation correspondant à une gestion optimisée des accessoires, c'est-à-dire à la recharge de la batterie par flux série aux moments les plus pertinents, et non par régulation de la tension batterie à une valeur de consigne donnée (cas du véhicule conventionnel, cf §1.5.2 p.12). Ceci implique d'autoriser une profondeur de décharge plus importante que sur un véhicule conventionnel. Le potentiel de gain correspondant est représenté par la zone de couleur rose clair ;

- ▷ du flux série, sans limitations. Il est alors possible d'utiliser de l'énergie pour réaliser du boost et du mode tout électrique, en plus de la compensation des accessoires. La consommation correspondante est représentée par la courbe de couleur rouge.
- ▷ de la récupération au freinage, sans limitations. Dans cette configuration, la décharge due aux accessoires est compensée par de la récupération au freinage exclusivement. Les consommations correspondantes sont représentées par le trait de couleur vert foncé ;
- ▷ du flux série et de la récupération au freinage, sans limitations, ce qui représente un gain total en consommation représenté par la zone de couleur vert clair.

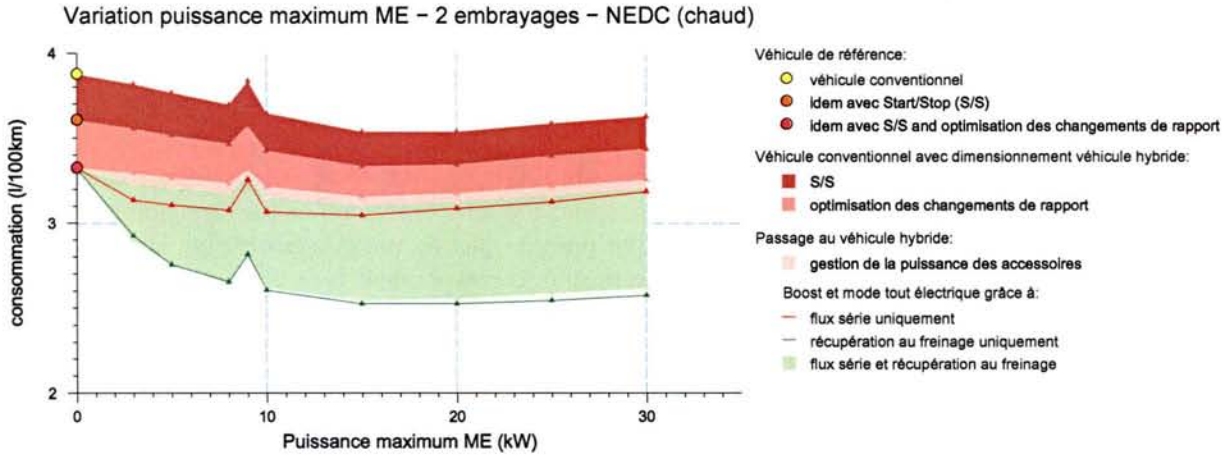


FIG. 10.2: *Variation de la consommation en fonction de la puissance maximum du moteur électrique*

Nous allons analyser les différents gains représentés sur la figure 10.2.

Mais avant cela, précisons deux points importants :

- ▷ la hausse de consommation vers 9 kW correspond à un dimensionnement particulier, utilisant le moteur Valeo Mars, de rendements plus faibles que ceux du moteur électrique utilisé dans les autres dimensionnements (car de coût plus élevé). Nous avons placé ce point sur le graphe du fait que le véhicule Clio 1,5 dCi avec moteur Mars correspond au prototype présent sur le banc moteur dynamique de l'INRETS ;
- ▷ on peut observer un léger écart entre la courbe de consommation du véhicule hybride avec récupération au freinage uniquement, et le bas de la zone vert clair correspondant au gain du flux série et de la récupération au freinage. Ceci est dû à l'erreur relative en puissance $\epsilon(T_{SOC})$ dans le graphe , donnant une erreur en consommation plus importante pour les fortes puissances de moteur électrique, comme on l'avait déjà constaté en §9.2 p.91.

10.1.1.2 Analyse de la figure 10.2

Gain dû au downsizing du moteur thermique L'apport du downsizing correspond à la différence entre la consommation du véhicule de référence (point jaune) et la consommation du véhicule hybride dont le moteur électrique et la batterie ne sont pas utilisés (limite supérieure

de la zone rouge sombre). Sur le graphe présenté, celui-ci est maximum pour une puissance du moteur électrique de 15 kW.

Au-dessus de 15kW, le gain dû au downsizing diminue du fait de la contrainte de vitesse minimum en pente sur autoroute : 110 km/h sur une pente à 5% (évoquée en §3.4 p.46). En effet, dans notre cas, celle-ci correspond au fonctionnement du véhicule en mode dégradé, ce qui impose une taille minimum de moteur thermique. Cette limite est atteinte dès 20 kW de moteur électrique (il n'est plus possible de diminuer la taille du moteur thermique), d'où la hausse de consommation due à l'augmentation du poids du véhicule avec la taille du moteur électrique et de la batterie.

Ce gain est dû à l'adaptation des bulles de rendement du moteur thermique par rapport aux puissances demandées à la roue pour le cycle NEDC. Il est donc dépendant du cycle considéré.

Gain dû à la fonction start/stop Ce gain varie peu puisqu'il est indépendant du dimensionnement de la batterie et du moteur électrique. Sa légère diminution lorsque la puissance du moteur électrique augmente provient de la diminution de taille du moteur thermique.

Gain dû à l'optimisation des changements de rapport Ce gain est établi en comparaison aux rapports « imposés », c'est-à-dire ceux choisis par un conducteur moyen. Ce gain dépend fortement du cycle suivi et du type de rapports imposés (conducteur nerveux ou économe).

Le cycle NEDC est particulier, en ce sens que les rapports imposés sont définis par la norme, et se trouvent déjà avantager des régimes de rotation faibles au niveau du moteur thermique (et donc prodiguant une consommation faible).

Pour un cycle d'usage réel, ce gain peut atteindre 17%.

Gain dû à une gestion optimisée de l'énergie consommée par les accessoires Ici ce gain reste faible, car la puissance consommée par les accessoires dans nos simulations est égale à 150W. Néanmoins, lorsque la puissance des accessoires électriques augmente, le gain en consommation devient très intéressant, comme cela est montré plus bas (§ 10.1.3).

Gain dû à l'apport du boost et du mode tout électrique Nous rappelons tout d'abord que l'énergie servant à réaliser le boost et le mode tout électrique provient, pour la zone verte :

- ▷ d'une part, de flux série ;
- ▷ d'autre part, de la récupération au freinage.

Si l'on interdit la récupération au freinage (courbe de couleur rouge), la stratégie n'utilise pas beaucoup le moteur électrique en boost et mode tout électrique, la consommation baisse peu. En revanche, si on l'autorise, on peut constater qu'elle s'avère très intéressante, puisque la courbe vert foncé correspond à un gain en consommation bien plus important. De plus, à partir du moment où l'on réalise de la récupération au freinage, il apparaît que le flux série n'apporte qu'un gain minime en consommation. En effet, la différence de consommation entre la courbe vert foncé et la base de la zone vert clair est nulle, à une tolérance découlant de la précision du graphe $\epsilon(T_{SOC})$ près (voir §9.2 p.91).

Cela est un résultat important, car il confirme que pour le véhicule et les composants considérés, le fonctionnement en flux série du véhicule n'est pas intéressant. La raison est la succession de rendement présente dans le flux série (moteur thermique vers batterie, puis batterie vers moteur

électrique), contrairement au flux parallèle dont l'énergie servant au moteur électrique provient de la récupération au freinage.

En d'autres termes, l'énergie récupérable au freinage est en quelque sorte gratuite, contrairement à l'énergie provenant du flux série qui correspond à l'utilisation du moteur thermique. La première se révèle donc bien plus intéressante.

Cela confirme la vision des constructeurs présentée en §10.3 : l'hybride série est celui qui a le plus faible potentiel de gain en consommation (hors cycles spécifiquement urbains).

Un autre point important est la saturation du gain en consommation du véhicule tout optimisé vers 15 kW. Cet optimum correspond à un compromis entre la puissance de moteur électrique permettant de réaliser toutes les récupérations au freinage sans utiliser les freins mécaniques, et l'adaptation des bulles de rendement du moteur thermique aux puissances de traction, sur le cycle considéré. Au-dessus de cette taille de moteur électrique, le poids de la batterie et du moteur électrique deviennent pénalisants. Néanmoins, cet optimum de puissance de moteur électrique correspond au cycle NEDC, et pourrait être différent sur des cycles comprenant des freinages plus brutaux.

10.1.2 Rendement maximum du moteur électrique

Le graphe 10.3 montre une décomposition similaire à celui commenté précédemment. Il fait apparaître le gain en consommation lorsque le rendement du moteur électrique et de son convertisseur augmente. Le moteur électrique considéré a une puissance maximum de 10 kW.

On constate une diminution de plus de 10% de la consommation lorsque le rendement du moteur électrique et de son convertisseur passe de 70 à 95%. On constate aussi que le flux série devient plus intéressant à mesure que le rendement augmente (courbe rouge).

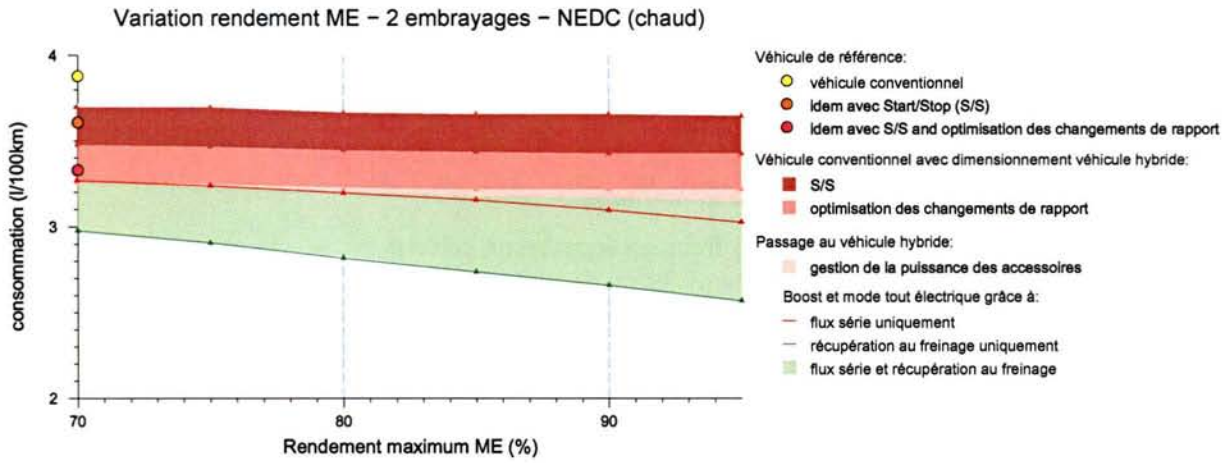


FIG. 10.3: *Variation de la consommation en fonction du rendement maximum du moteur électrique*

10.1.3 Puissance des accessoires électriques

Le graphe 10.4 représente la variation de la consommation lorsque la puissance des accessoires augmente (moteur électrique de 10 kW comme précédemment). La consommation du véhicule de référence (tel quel, avec start/stop, et avec start/stop et optimisation des changements de rapport) est représentée pour chacune des puissances d'accessoires.

On constate :

- ▷ une augmentation quasi-linéaire de la consommation en fonction de la puissance consommée par les accessoires, ceci quelle que soit l'architecture considérée (thermique conventionnelle ou hybride). En revanche, la pente varie d'une architecture à l'autre : $1,9\,\mathrm{l}/100\mathrm{km}/\mathrm{kW}$ pour le véhicule conventionnel, $1,2\,\mathrm{l}/100\mathrm{km}/\mathrm{kW}$ pour le véhicule hybride, qui s'avère donc mieux adapté aux fortes puissances des auxiliaires ;
- ▷ au dessus de 300 W de puissance accessoires, la récupération au freinage ne suffit plus à assurer un bilan batterie nul sur le cycle ;
- ▷ lorsque la puissance passe au-dessus de 1kW, le gain dû à la gestion optimisée des accessoires devient prépondérant.

Le deuxième point montre les limites de la récupération au freinage, ainsi que la nécessité de réaliser du flux série pour compenser l'état de charge sur le cycle. Ainsi, même si ce dernier n'est pas forcément intéressant d'un point de vue gain de consommation (§10.1.1.2), il n'en reste pas moins nécessaire lorsqu'on veut réaliser du charge sustaining.

Notons que la gestion optimisée des accessoires implique de tolérer des profondeurs de décharge et donc des variations de tension plus importantes. Ceci peut être problématique pour certains composants du véhicule, par exemple les ampoules du système d'éclairage véhicule, car leur durée de vie est très dépendante de la stabilité de la tension à leurs bornes [Bos00]. Par ailleurs, la durée de vie de la batterie dans ces conditions de fonctionnement sera à vérifier.

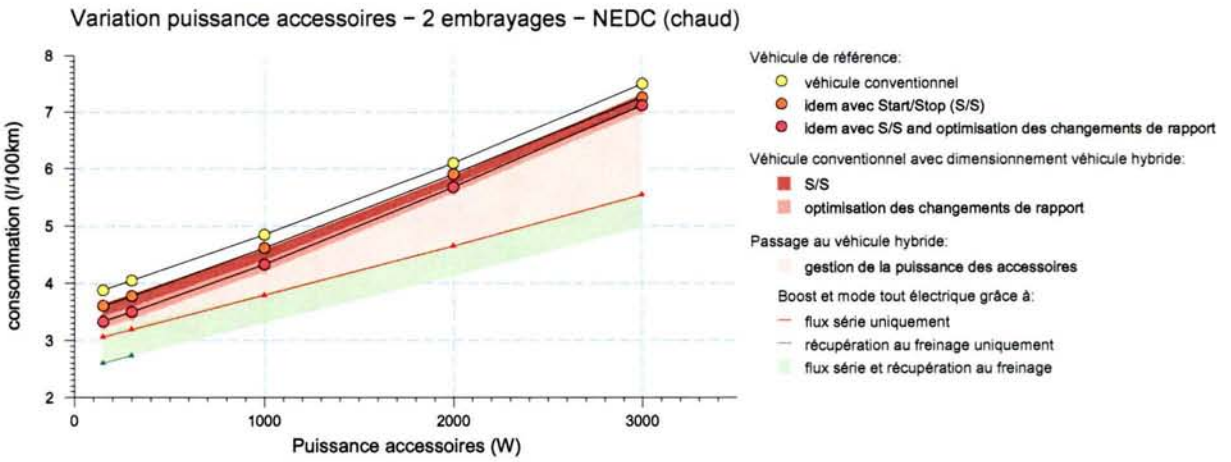


FIG. 10.4: *Variation de la consommation en fonction de la puissance des accessoires*

10.2 Comparaison entre architectures

Sur la figure 10.5 est représentée la variation de la consommation de carburant en fonction de la puissance du moteur électrique embarqué, pour :

- ▷ le VHTE deux embrayages et le véhicule conventionnel de référence précédemment évoqués ;
- ▷ le VHTE un embrayage ;
- ▷ les véhicules thermique et hybride idéaux décrit en §8.4 p.89.

Tous les véhicules ont les performances du véhicule conventionnel de référence, comme précédemment. Nous remarquons les points suivants :

- ▷ à partir de 5 kW de moteur électrique, la différence absolue de consommation entre les véhicules hybrides n'évolue plus ;
- ▷ le surplus de consommation entre le véhicule hybride deux embrayages et le véhicule hybride idéal correspond au couplage discret (boîte de vitesse à nombre de fini de rapports) et au rendement mécanique de la transmission ;
- ▷ le véhicule hybride un embrayage avec un moteur électrique de 3 kW présente une consommation plus faible que le véhicule thermique idéal. Ceci montre l'intérêt de l'hybridation, par rapport à des solutions plus conservatrices visant l'amélioration des motorisations conventionnelles ;
- ▷ l'optimum de consommation pour les architectures hybrides est obtenu pour la même valeur de puissance électrique (entre 15 et 20 kW pour le cycle NEDC).

D'autres résultats sont disponibles dans l'étude paramétrique PARAVH [DRST+04].

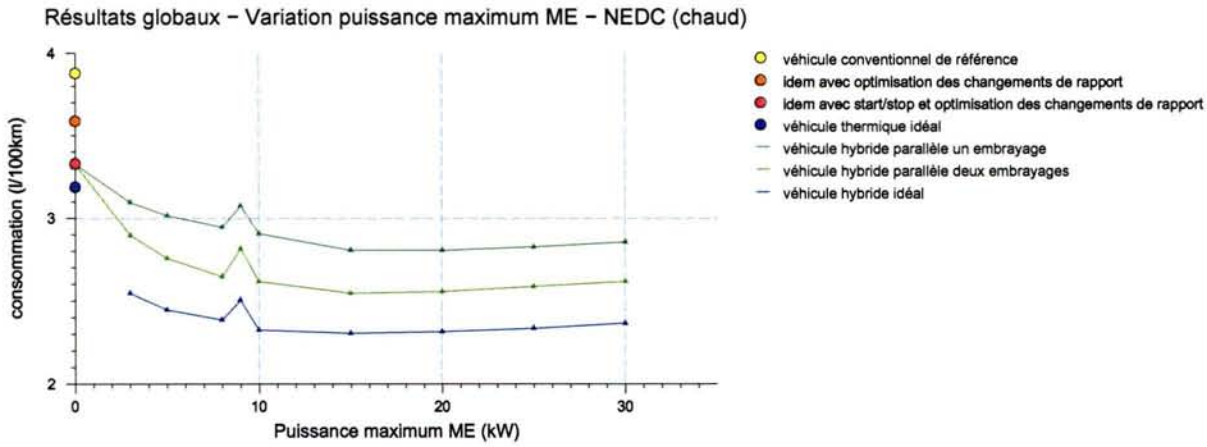


FIG. 10.5: *Variation de la consommation en fonction de la puissance maximum du moteur électrique, pour diverses architectures*

10.3 Conclusion : éléments de réponse concernant la valeur relative des différents types de VHTE

Les gains de consommation annoncés précédemment sont des potentiels, en ce sens que dans un fonctionnement en ligne, et suivant les lois de gestion en ligne implémentées :

- ▷ les consommations pourraient augmenter dans des proportions relativement importantes, du fait de la perte de l'aspect optimisation globale. Dans la partie suivante III, nous proposerons une stratégie en ligne susceptible d'être utilisée sur un véhicule en condition de fonctionnement. Nous présenterons alors les gains de consommation par rapport au véhicule de référence pour un fonctionnement en ligne, en les comparant à ceux obtenus avec KOALA pour une optimisation hors ligne ;
- ▷ en toute rigueur, la hiérarchie entre les divers dimensionnements pourrait être modifiée. En particulier, des éléments secondaires (e.g. difficulté de mise en oeuvre) pourraient amener à réévaluer l'avantage de l'hybride parallèle sur l'hybride série (par exemple).

Quoi qu'il en soit, ces résultats sont intéressants, dans la mesure où pour la première fois[52] à notre connaissance une étude de potentialité des diverses architectures de véhicule hybride a été menée :

- ▷ à iso-performances dynamiques ;
- ▷ en utilisant un outil d'optimisation globale fournissant de manière systématique la stratégie optimum sur le cycle considéré.

De plus, plusieurs véhicules de référence ont été examinés, ainsi que plusieurs cycles de conduite vitesse-temps, couvrant des usages de l'urbain à l'autoroutier.

Pour des comparaisons avec l'hybride série et l'hybride à dérivation de puissance, le lecteur pourra se référer à [DRST+04].

Ces résultats sont à comparer à la vision de certains constructeurs. À travers [MLK01], Volkswagen classe les différentes architectures à performances dynamiques égales. Dans l'ordre, il vient, pour une consommation de référence du véhicule conventionnel sans start/stop de 100% :

1. le VHTE série, le plus mauvais, avec une consommation de 114% ;
2. le véhicule de référence avec start/stop, avec une consommation de 90% ;
3. le VHTE à dérivation de puissance, 84% ;
4. le VHTE parallèle, 76%.

Le tableau 10.1, emprunté du même article [MLK01], permet de visualiser les avantages et inconvénients de chaque architecture. Nous avons rajouté une ligne intitulée « facilité de mise en oeuvre » qui pourrait très bien s'avérer déterminante, dans la mesure où, par exemple, les difficultés soulevées dans le fonctionnement d'un VHTE deux embrayages sont considérables.

[52] Sans doute à cause de la complexité des outils informatiques à mettre en oeuvre, ainsi que de leur interfaçage.

Type de VHTE	série	parallèle	dérivation de puissance
performance	+	++	++
consommation	-	++	+
émissions	++	0	+
poids	–	0	0
prix	–	0	-
confort	++	+	++
facilité de mise en oeuvre	++	-	0

TAB. 10.1: *Comparaison des configurations hybrides d'après Volkswagen*

Troisième partie

Stratégie en ligne

Chapitre 11

Loi de gestion en ligne : problématique et état de l'art

Dans un véhicule hybride, la détermination de la répartition de la puissance demandée par le conducteur entre le moteur électrique et le moteur thermique est assurée via une loi de gestion en ligne (cf §4.1.1 p.4.1.1). Elle peut être aussi bien appliquée dans un logiciel de type forward que backward. Lors de sa conception, deux objectifs sont à respecter :

- ▷ le contrôle de l'état de charge de la batterie sur un cycle de conduite vitesse-temps. Ceci peut être considéré comme une contrainte. Ce point sera examiné plus en détail en §11.3 p.121 ;
- ▷ la réduction de la consommation de carburant, l'objectif étant de tendre vers l'optimum obtenu par KOALA (néanmoins impossible à atteindre). Ceci peut être considéré comme un critère.

Pour un même véhicule (notamment mêmes architecture et dimensionnement) et sur un cycle considéré, il sera possible de proposer une multitude de lois de gestion en ligne, contrairement à la loi de gestion optimale de l'énergie sur ce cycle, qui est unique.

11.1 Comparaison de stratégies

Dans [Del02], S. Delprat insiste sur la difficulté de comparer des stratégies entre elles via-à-vis du critère consommation, car souvent chacune nécessite une phase de réglage qui peut être plus ou moins longue. L'idéal est donc de les comparer lorsque leurs paramètres respectifs sont optimisés, ce qui est un problème complexe dont la résolution paraît difficilement envisageable.

Une condition sine qua non à la comparaison de stratégies, est d'annoncer les consommations de carburant pour une différence d'état de charge nulle entre le début et la fin du cycle de conduite envisagé :

- ▷ Dans [Del02], S. Delprat introduit un critère permettant de comparer des stratégies fournissant des différences d'état de charge variables. Les résultats de consommation pour un ΔSOC donné sont rapportés à la consommation fournie par l'optimisation globale pour le même ΔSOC. Il faut alors prendre en compte le fait que la variation de consommation sur le cycle par unité de ΔSOC pourrait dépendre de la stratégie considérée ;
- ▷ Une autre possibilité pour annoncer la consommation est de faire travailler la stratégie directement à iso-état de charge. Nous verrons que cela est possible si celle-ci respecte un certain nombre de conditions suffisantes, sur un cycle donné (§11.3 p.121).

11.2 Revue des lois de gestion d'énergie proposées dans la littérature

11.2.1 Lois de gestion basées sur des règles empiriques ou issues de l'analyse énergétique du système véhicule hybride

11.2.1.1 Lois de gestion empiriques

On trouve dans la littérature un grand nombre de lois de gestion en ligne de conception empirique [BM99, VV04, FFB00b, WCZ01, VdT00]. Parmi celles-ci, on trouve beaucoup de lois utilisant la logique floue.

La plupart de ces stratégies sont telles que plus la batterie est déchargée, plus la stratégie a propension à la recharger ; ceci afin de maintenir l'état de charge batterie dans des limites raisonnables.

On peut reprocher à ce type de démarche d'être parfois difficilement justifiable. Néanmoins, elles peuvent fournir de bons résultats. C'est le cas pour la stratégie du thermostat, utilisée dans [Del02].

Thermostat La stratégie du thermostat consiste à se placer en mode hybride lorsque l'état de charge atteint une valeur de seuil bas, et en mode tout électrique lorsqu'il atteint une valeur de seuil haut. Entre ces deux valeurs, le mode courant est conservé. Cela revient donc à une stratégie oscillant entre mode hybride ($elhyb = 1$) et mode tout électrique ($elhyb = 0$) avec un hystérésis sur l'état de charge. Les seuils de déclenchement peuvent être fixes ou variables.

Cette stratégie présuppose que le mode tout électrique est possible. D'autre part, celui-ci ne doit pas l'être que sporadiquement :

- ▷ d'une part, le moteur électrique et la batterie doivent être suffisamment puissants pour subvenir aux besoins à la roue en usage moyen ;
- ▷ d'autre part, l'énergie disponible dans la batterie doit être suffisante pour que le mode tout électrique dure assez longtemps.

Cela restreint donc l'intérêt du thermostat aux architectures et dimensionnements fortement hybridés (« full hybrid »). De telles stratégies ont été utilisées notamment pour les véhicules hybrides série, pour lesquels elles sont bien adaptées.

11.2.1.2 Lois de gestion basées sur l'analyse des flux énergétiques dans le système véhicule hybride

Minimisation instantanée des pertes [Del02] Dans cette loi de gestion (Loss Minimization Strategy : LMS), la somme des pertes dans la chaîne de traction est évaluée pour une valeur de couple et de vitesse à la roue, et pour chaque rapport de boîte possible. L'objectif est de choisir la répartition de puissance et le rapport qui minimisent ces pertes. Cependant, dans ces conditions l'état de charge n'est pas contrôlé. Il est donc nécessaire d'introduire une fonction de sensibilité qui va déplacer ce point de fonctionnement en faveur de la charge ou décharge batterie.

Calcul de la consommation équivalente [Del02, PEB+01] Si l'on envisage de travailler en charge sustaining, la décharge de la batterie à un instant donné sera compensée par une recharge ayant lieu plus tard, provenant :

- ▷ d'une part, de la récupération au freinage ;
- ▷ d'autre part, de recharge directe par le moteur thermique (flux série).

Dans la loi de gestion ECMS (Equivalent Consumption Minimization Strategy), une consommation de carburant équivalente à la recharge future de la batterie est calculée. L'objectif est de choisir le rapport de boîte et le couple moteur thermique minimisant à chaque instant la consommation instantanée de carburant plus la consommation équivalente à la décharge batterie.

Comme dans la stratégie de minimisation instantanée des pertes, il est nécessaire de prendre en compte une fonction de sensibilité permettant de favoriser la recharge ou la décharge batterie. Sans quoi l'état de charge batterie ne ferait que diminuer.

11.2.2 Méthodes basées directement sur des résultats d'optimisation globale

Comme nous l'avons détaillé dans le chapitre 4 p.49, les algorithmes d'optimisation globale permettent :

- ▷ de définir des consommations de référence. À modèle identique et sur le cycle considéré, une stratégie en ligne ne pourra donner une consommation plus faible ;
- ▷ dans certaines circonstances, et avec certaines modifications, il est possible d'utiliser plus ou moins directement les résultats de l'optimisation sans passer par la phase d'analyse des différentes phases de fonctionnement par un humain (§ 11.2.2.1 et § 11.2.2.2) ;
- ▷ de faciliter la constitution de lois expertes via l'analyse des résultats d'optimisation. Cette expertise pourra ensuite être mise à profit dans l'élaboration de stratégies en ligne (§ 11.2.2.3).

11.2.2.1 Utilisation directe des résultats de l'optimisation

Dans [Dub02], A. Dubray s'attache à l'architecture hybride série, dans le cas d'un bus. Sur un cycle vitesse-temps donné, elle obtient, via le principe du maximum de Pontryaguine, une cartographie $P_g = f(P_R, K)$ donnant la puissance du groupe électrogène en fonction de la puissance demandée à la roue et d'un paramètre scalaire K définissant la propension à plus ou moins décharger la batterie sur le cycle. Chaque valeur de K correspond à une différence d'état de charge ΔSOC sur le cycle, la répartition instantanée de puissance entre la batterie et le groupe électrogène étant optimale, et donc la consommation de carburant sur le cycle minimale. Par dichotomie est obtenue la valeur de K qui réalise l'iso-état de charge sur le cycle. Cette valeur correspond à un profil d'état de charge optimal sur le cycle. Le véhicule étudié étant un bus, il est possible de connaître avec précision le chemin emprunté, ce qui rend possible la régulation de l'état de charge par rapport à la valeur optimale placée en mémoire du calculateur. Notons que :

- ▷ cette cartographie est valable pour un usage donné (cycle, charge en passagers, etc.) ;
- ▷ la cartographie donnant la puissance du groupe électrogène fonction de la valeur de K et de la puissance demandée à la roue est une fonction. Notons que certains des résultats fournis par KOALA montrent que ce n'est pas toujours le cas (il n'y a pas de raison a priori que ce le soit) : suivant l'instant dans le cycle vitesse-temps, il est possible qu'à un point de couple et vitesse à la roue, deux répartitions différentes soient optimales. En particulier, pour une répétition d'un même cycle élémentaire :

◇ soit un cycle élémentaire est tel que l'état de charge entre le début et la fin de celui-ci est le même, en considérant l'état de charge optimal sur la succession de cycles élémentaires ;
◇ soit celui-ci est différent, et alors pour travailler à iso-état de charge sur le cycle complet, il est nécessaire qu'à un moment ou un autre la répartition de couple sur un cycle élémentaire diffère de son successeur (par exemple en réalisant plus de flux série).

Pour pouvoir utiliser ce type de cartographie en ligne sur un cycle vitesse-temps inconnu, il est intéressant de faire varier le cycle et d'observer l'évolution de $P_g = f(P_R, K)$. Soit celle-ci varie peu et alors il est possible de l'utiliser directement en ligne, soit dans le cas contraire il est nécessaire de choisir un jeu de cycles couvrant tous les usages possibles du véhicule (urbain, routier, autoroutier), et d'établir sur chacun d'entre eux la cartographie optimale correspondante. Il reste à savoir en conditions de fonctionnement :

▷ quelle cartographie utiliser (urbain, routier, ou autoroutier) ;
▷ avec quelle valeur de K, c'est-à-dire en visant quel état de charge sur le cycle.

11.2.2.2 Utilisation indirecte des résultats de l'optimisation

Dans [Del02], S. Delprat utilise un algorithme d'optimisation globale (décrit en §7.2.1 p.78), modifié pour satisfaire les contraintes d'une utilisation en ligne (« version instantanée »). Celui-ci est paramétré par un paramètre λ analogue au K utilisé par A. Dubray, c'est-à-dire qu'il régit la propension de la batterie à se décharger. Cette stratégie est nommée $\lambda-$control, car la valeur de λ est régulée de manière à ce que l'état de charge de la batterie reste compris dans une certaine plage de valeurs. Le régulateur est de type proportionnel-intégral.

Soulignons le fait que cette stratégie dérivée de l'algorithme d'optimisation globale n'est pas celle qui donne la consommation la plus faible. En effet, une stratégie de type thermostat (donc empirique) testée par S. Delprat s'avère donner des consommations plus proches de l'optimum[53] dans un facteur 2. Cela est compréhensible, dans la mesure où un algorithme d'optimisation globale n'est adaptable pour l'usage en ligne qu'avec des modifications substantielles.

Dans [Ven01], N. Venot utilise un thermostat avec des seuils d'état de charge variables. Ceux-ci sont déterminés à partir des résultats de l'optimisation globale menée sur une succession de dix cycles représentatifs de l'usage général d'un véhicule. N. Venot n'aborde pas la problématique de la pertinence de cette stratégie par rapport au dimensionnement du véhicule.

Pour notre part, nous proposerons dans le chapitre 12 p.131 une méthode d'utilisation des résultats d'optimisation hors ligne via une approche par réseaux de neurones. Celle-ci a pour avantage de nécessiter un minimum de réglages.

11.2.2.3 Analyse des résultats pour élaboration de lois expertes

Une autre voie est d'analyser les résultats d'optimisation afin d'éventuellement observer des comportements récurrents qu'il serait possible de reproduire en ligne.

Pour ce faire, il parait important de choisir attentivement les cycles à utiliser lors de l'optimisation globale, afin de faciliter l'analyse des résultats.

[53] Précisons que le véhicule étudié dans ce cas possède un moteur électrique de même puissance que le moteur thermique. Ce dimensionnement particulier a de l'influence sur la pertinence de la stratégie thermostat, déjà par le fait que la puissance du moteur électrique permet l'utilisation conséquente du mode tout électrique.

Première tentative : application de la méthode statistique des centres mobiles Une première idée a été de se placer dans le plan puissance roue/état de charge et d'examiner pour chacun des points correspondants la répartition de puissance entre le moteur électrique et le moteur thermique. La question est alors de savoir si des points proches dans ce plan correspondent à des répartitions moteur électrique/moteur thermique proches. Afin de traiter les données de manière systématique, nous avons utilisé la méthode statistique des centres mobiles.

Un nombre de classes correspondant à une valeur de répartition de la puissance entre le moteur électrique et le moteur thermique est fixé. En quelques itérations, l'algorithme en question permet de minimiser la variance intraclasse [Sap90].

Il aurait été intéressant de voir apparaître une localisation des classes de répartition, suivant la valeur d'état de charge et de puissance à la roue. En particulier, une utilisation plus importante du moteur électrique quand l'état de charge et la puissance à la roue augmentent. En réalité, aucune tendance exploitable n'a pu être mise en évidence sur les cycles testés.

Deuxième tentative : examen des résultats sur des cycles de type créneaux L'idée est ici de faciliter l'analyse des résultats. On peut penser que les paramètres entrant en jeu dans la détermination de la stratégie optimale sur un cycle sont :

▷ la succession des vitesses sur ce cycle, et leur valeur ;
▷ les accélérations correspondantes.

Ces deux paramètres traduisant la puissance à la roue. Comme on envisage de représenter les points de fonctionnement du véhicule dans le plan (P_R, P_{ME}), il est intéressant d'obtenir suffisamment de points distincts sur un cycle donné. Une possibilité est de choisir une puissance augmentant (resp. diminuant) de manière linéaire dans les phases d'accélération (resp. décélération), ce qui peut s'écrire, à une constante multiplicative près :

$$\Omega_R(t) \cdot \frac{d\Omega_R}{dt} = A \cdot t$$

qui donne :

$$\Omega_R(t) = B \cdot t$$

Cela revient à parcourir un créneau de vitesse.

Dans KOALA, on fait varier le ΔSOC sur le cycle, ainsi que la constante B et la vitesse maximale $\Omega_{R_{max}}$ du cycle (figure 11.1), avec les hypothèses suivantes :

▷ B fixé de telle manière que l'accélération varie entre $0,4\,\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2}$ et $2\,m \cdot s^{-2}$;
▷ V_{max} entre $10\,\mathrm{km/h}$ et $130\,\mathrm{km/h}$.

Un exemple de répartition des points de fonctionnement du véhicule dans le plan puissance moteur électrique fonction de la puissance à la roue est représenté sur la figure 11.2. On peut remarquer que le véhicule fonctionne en mode tout électrique pour une puissance à la roue inférieure à 3 ou 4 kW. Le graphe ne comprend qu'un seul point correspondant à du flux série. Sur d'autres graphes du même type, le flux série n'apparaît clairement que lorsque le ΔSOC désiré sur le cycle devient important. Le boost reste relativement rare. Ces résultats, qualitatifs mais aussi et surtout quantitatifs sont difficilement exploitables en vue de l'élaboration d'une stratégie en ligne.

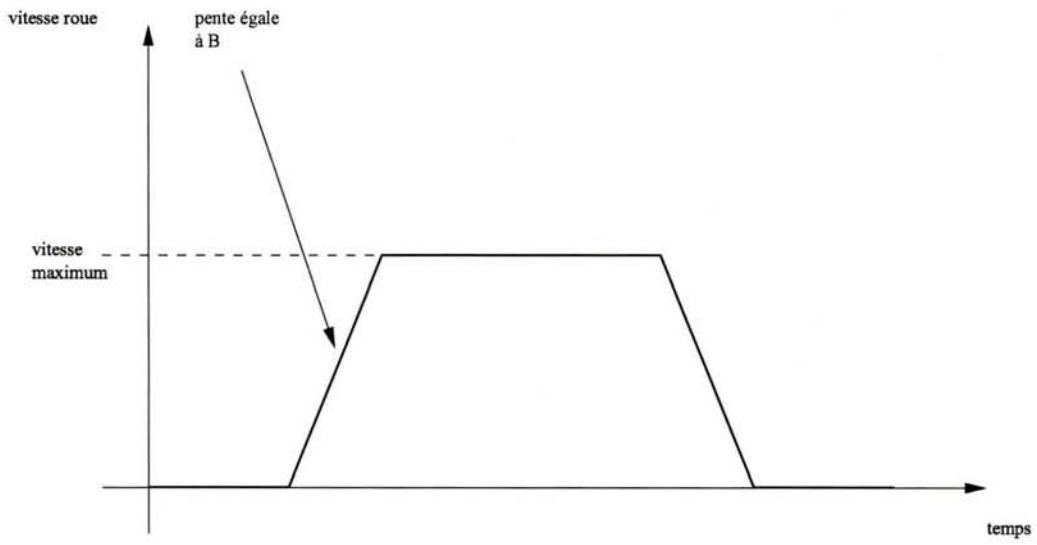


FIG. 11.1: *Créneau de vitesse élémentaire*

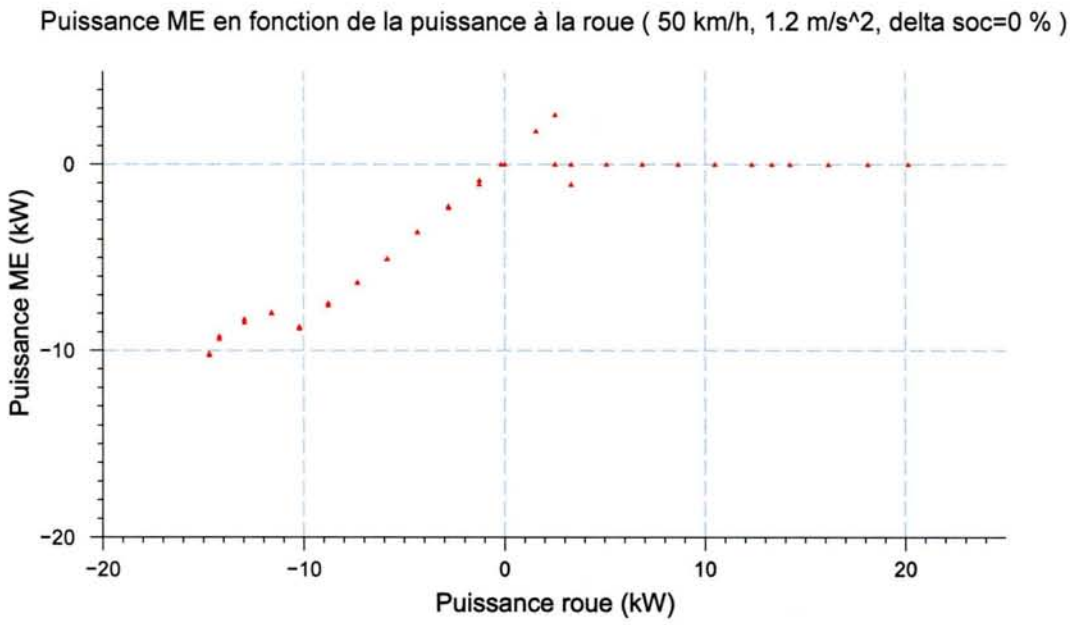


FIG. 11.2: *Points de fonctionnement du véhicule dans le plan puissance moteur électrique fonction de la puissance à la roue*

11.2.2.4 Élaboration d'une loi de gestion en ligne utilisant les conclusions de l'analyse des résultats d'optimisation sur des cycles de type créneaux

À la suite de l'analyse des résultats d'optimisation sur les cycles de type créneaux précédemment évoqués, nous avons tenté de mettre au point une stratégie reproduisant le comportement optimal donné par KOALA.

Il est alors nécessaire de réguler l'état de charge de la batterie par rapport à un état de charge de consigne donné. Nous nous sommes heurtés au réglage des paramètres proportionnel et intégral. D'autre part :

- ▷ lors de divers essais, il a été constaté que lorsqu'on changeait la puissance du moteur électrique, toute la procédure de réglage était à refaire ;
- ▷ il n'a pas été facile de déterminer quand réaliser du flux série, et dans quelles quantités.

C'est pourquoi nous avons privilégié une approche par réseaux de neurones, présentée en chapitre 12 p.131. Comme nous le verrons, son intérêt est de déterminer de manière *systématique* une loi de gestion, à partir des résultats de l'optimisation globale. En particulier, il n'est pas nécessaire de choisir empiriquement quand et comment faire du flux série ou du boost, ni d'introduire un régulateur dont les paramètres sont à régler.

Avant de l'introduire, abordons le problème du contrôle de l'état de charge batterie.

11.3 Problématique du contrôle de l'état de charge batterie

11.3.1 Gestion du mode dégradé

Le constructeur d'une batterie fournit une plage d'état de charge conseillée $[soc_{min}; soc_{max}]$. En dehors de celle-ci, les puissances maximales en charge et décharge de la batterie, ainsi que sa durée de vie ne seront plus garanties.

D'une part, nous avons vu en §3.3 p.44 que dans certaines conditions le mode dégradé était inévitable. Il est donc important de prévoir un « fonctionnement d'urgence » lorsque l'état de charge atteint soc_{min} :

- ▷ soit interdisant l'utilisation de la batterie ;
- ▷ soit forçant le flux série afin de la recharger.

D'autre part, si l'état de charge venait à atteindre soc_{max}, il serait aisé d'interdire la recharge de la batterie, ou bien de forcer son utilisation.

La gestion du mode dégradé ne pose donc pas de problème a priori.

Notons que dans les deux cas, le critère consommation de carburant n'est pas pris en compte.

11.3.2 Mode de fonctionnement normal

11.3.2.1 Notion de contrôle de l'état de charge sur un cycle

Pour un cycle ne représentant pas des conditions d'usage extrêmes propices à l'apparition du mode dégradé, il est de bon aloi que l'état de charge batterie reste dans les limites préconisées par le constructeur.

Dans cette perspective, beaucoup de stratégies en ligne proposées dans la littérature reposent sur la définition d'un état de charge visé soc_c (grandeur de consigne), et la régulation de l'état de charge instantané par rapport à celui-ci. Cette régulation est réalisée via des correcteurs généralement de type proportionnel intégral [Del02, Dub02]. Éventuellement ils incluent un terme de type sigmoïde (tangente hyperbolique) [Dub02], c'est-à-dire équivalent à un proportionnel dont la valeur augmenterait avec l'erreur courante. Il est légitime de s'interroger sur la validité de cette démarche :

- ▷ d'une part parce que réguler l'état de charge par rapport à une valeur constante peut avoir un impact néfaste sur la consommation. En effet, étant donné que toute une plage d'état de charge est permise, peut-être est-il intéressant, d'un point de vue consommation de carburant, que l'état de charge courant puisse se déplacer dans celle-ci sans avoir de consigne bien définie. Notons que cette remarque ne vaut pas pour le travail effectué par [Dub02] puisque là le cycle est connu à l'avance, et le profil optimum d'état de charge par la même occasion (trajet de bus) ;
- ▷ d'autre part parce qu'il est possible que pour un cycle exigeant, le régulateur ne permette pas d'atteindre la consigne d'état de charge désirée (non-commandabilité). Ou plus généralement, que le régulateur ne parvienne pas à maintenir l'état de charge dans la plage conseillée.

D'après ces considérations, il paraît pertinent de s'intéresser à la notion de contrôle de l'état de charge sur un cycle et par une stratégie donnés, que nous définissons ci-après.

Définition 1 : Contrôle de l'état de charge au sens large Soit un véhicule, son architecture et son dimensionnement. Soit un cycle de conduite vitesse-temps et une demande d'accessoires donnés. La plage conseillée d'utilisation de la batterie $[soc_{min}; soc_{max}]$ est connue. On dit qu'une stratégie de gestion contrôle l'état de charge de la batterie sur le cycle de conduite considéré si en répétant ce cycle, le profil d'état de charge rentre dans l'intervalle $]soc_{min}; soc_{max}[$ au moins momentanément.

□

Cette définition autorise donc des instants de fonctionnement en mode dégradé. Il s'agit de « contrôle large », par opposition au « contrôle asymptotique » que nous définirons dans le paragraphe suivant (§11.3.2.2).

11.3.2.2 Conditions suffisantes au contrôle asymptotique de l'état de charge sur un cycle

Notations L'architecture du véhicule hybride A étant connue, fixons une chaîne de traction C. La puissance demandée par les accessoires est connue à chaque instant.

Notons alors $\mathcal{S}(A, C)$ l'ensemble des stratégies de gestion possibles S pour le véhicule C, l'architecture A étant définie. Une stratégie associe à un état de charge initial soc_i un cycle vitesse-temps donné V, et un profil de demande accessoires P_{ACC} un profil d'état de charge sur le cycle SOC :

$$\begin{array}{rccc} s \in \mathcal{S}(A,C): & \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \times [0;1] & \rightarrow & \mathbb{R}^{n+1} \\ & (V, P_{ACC}, soc_i) & \rightarrow & s(V, P_{ACC}, soc_i) = SOC \end{array}$$

Ici, on suppose que le profil d'état de charge ne dépend que de l'état de charge initial, du cycle de conduite à la roue, et de la demande des accessoires.

Évidemment, on a $SOC(t=0) = soc_i$. Notons I_{SOC} le courant batterie sur le cycle (en considérant par exemple un modèle $E(SOC) + R \cdot I(SOC)$ sans rendement faradique) correspondant au vecteur SOC :

$$\begin{array}{rccl} I: & \mathbb{R}^{n+1} & \rightarrow & \mathbb{R}^n \\ & SOC & \rightarrow & \forall i \in [0; n-1], \quad I_{SOC}(i) = \frac{SOC(i+1)-SOC(i)}{t_{i+1}-t_i} = \frac{SOC(i+1)-SOC(i)}{T_e} \end{array}$$

Notons $\Delta(SOC)$ la différence d'état de charge de la batterie entre le début et la fin du cycle :

$$\begin{array}{rccl} \Delta: & \mathbb{R}^{n+1} & \rightarrow & \mathbb{R} \\ & SOC & \rightarrow & \Delta(SOC) \quad = SOC(n) - SOC(0) \end{array}$$

Propriété 1 Considérons une stratégie $s \in \mathcal{S}(A, C)$, telle que :

- ▷ pour la même valeur des paramètres influant sur la stratégie, la décharge instantanée est d'autant plus grande (ou la recharge d'autant plus petite) que l'état de charge courant est grand (CONDITION 0) ;
- ▷ tous les paramètres influant sur la stratégie sont connus, et inchangés lorsqu'on répète le cycle (CONDITION 0').

Considérons deux courbes d'état de charge fournies par la stratégie s sur le cycle V et pour une puissance d'accessoires P_{ACC} , à partir de deux états de charge initiaux différents.

Si ces deux courbes se rejoignent, alors elles seront confondues jusqu'à la fin du cycle.

Notons que les paramètres influant sur la stratégie, utilisés pour formuler les conditions 0 et 0', sont les suivants :

- ▷ vitesse instantanée sur le cycle V, ainsi que puissance des accessoires P_{ACC} ;
- ▷ état de charge de la batterie courant, qu'on fait varier mentalement dans la condition 0.

Conséquences des conditions 0 et 0' Soient deux valeurs d'état de charge initial batterie $soc_i \neq soc_i'$. Notons :

$$SOC = s(V, P_{ACC}, soc_i)$$
$$SOC' = s(V, P_{ACC}, soc_i')$$

La condition 0 implique que si à certains instants $i \cdot T_e$, $SOC(i) > SOC'(i)$ (resp. $SOC(i) < SOC'(i)$), alors :

$$I_{SOC}(i) > I_{SOC'}(i) \tag{11.1}$$

(resp. $I_{SOC}(i) < I_{SOC'}(i)$). Cela revient à affirmer que la pente instantanée de la courbe supérieure est inférieure (en valeur algébrique) à celle de la courbe inférieure.

Si l'on suppose la condition 0' également vérifiée, et donc par voie de conséquence la propriété 1, on peut affirmer que si $soc_i \geq soc_i'$, alors $\forall i \in [0; n]$, $SOC(i) \geq SOC'(i)$, en particulier :

$$soc_f \geq soc_f' \tag{11.2}$$

Où soc_f et $soc_f^{'}$ représentent les états de charge finaux des courbes SOC et $SOC^{'}$. On a alors également $I_{SOC}(i) \geq I_{SOC'}(i)$. Ce qui implique, dans le cas où le temps est discrétisé :

$$\sum_{i=0}^{n} I_{SOC}(i) \cdot T_e \geq \sum_{i=0}^{n} I_{SOC'}(i) \cdot T_e$$

Soit :

$$soc_f - soc_i \geq soc_f^{'} - soc_i^{'} \tag{11.3}$$

Pour résumer, 11.1 est une conséquence de la condition 0, tandis que 11.2 et 11.3 sont des conséquences des conditions 0 et 0', devant être vérifiées simultanément.

Preuve de la propriété 1 Plaçons-nous dans le cas continu, et supposons que les deux courbes d'état de charge se rejoignent. La condition 0' est équivalente à affirmer que pour un même état de charge initial sur le cycle V et pour le profil d'accessoires P_{ACC}, la décharge instantanée de la batterie est connue et unique. Cela suffit à assurer que les deux courbes restent confondues jusqu'à la fin du cycle.

Dans le cas où le temps est discrétisé, les deux courbes ne peuvent pas se rejoindre rigoureusement parlant. Supposons que les deux courbes se coupent entre deux échantillons. Cela est possible s'il existe à un instant donné une grosse différence de pente entre les deux courbes (donc de courant batterie). Dans ce cas, il suffit d'invoquer la relation 11.1, de laquelle on déduit le résultat : deux courbes qui se coupent ont propension à rester proches l'une de l'autre.

Notons qu'en réalité, il est rare d'obtenir une intersection. Pour la plupart des stratégies, les deux courbes se rapprocheront l'une de l'autre de manière asymptotique sans jamais se couper.

□

Note Il est intéressant de constater qu'on retrouve dans une stratégie en ligne vérifiant les conditions 0 et 0' le comportement qui était celui observé dans les stratégies optimales fournies par l'algorithme d'optimisation globale, à savoir que deux courbes qui se rejoignent restent confondues jusqu'à la fin du cycle. Cependant les causes sont complètement différentes, puisque pour les stratégies optimales l'origine de ce comportement est le principe d'optimalité de Bellman.

À la suite de cette constatation, on peut se demander si les stratégies optimales fournies par KOALA respectent la condition 0. Le lecteur trouvera des éléments de réponse dans le prochain paragraphe (§11.4).

□

Propriété 2 Soit une stratégie $s \in \mathcal{S}(A, C)$, telle que les conditions 0 et 0' soient respectées.

Si un cycle de vitesse à la roue $V \in \mathbb{R}^n$ et le profil de puissance d'accessoires correspondant $P_{ACC} \in \mathbb{R}^n$ sont tels que :

1. il existe une valeur initiale d'état de charge soc_i comprise dans la plage d'utilisation de la batterie telle que $\Delta(s(V, P_{ACC}, soc_i)) < 0$, c'est-à-dire telle que la batterie se décharge sur le cycle ;

2. il existe une valeur initiale d'état de charge $soc_i^{'}$ comprise dans la plage d'utilisation de la batterie telle que $\Delta(s(V, P_{ACC}, soc_i^{'})) > 0$, c'est-à-dire telle que la batterie se recharge sur le cycle ;

Alors il existe une valeur initiale d'état de charge dans la plage d'utilisation de la batterie soc_0 telle que $\Delta(s(V, P_{ACC}, soc_0)) = 0$.

Preuve Les conditions 1 et 2 peuvent se vérifier en examinant la variation d'état de charge sur le cycle lorsque l'état de charge initial est égal à 100% ou 0% (ou toutes autres valeurs correspondant aux limites de la plage d'utilisation de la batterie). Notons qu'elles n'excluent pas l'existence d'un mode dégradé pendant une partie du cycle.

En réalité, une démonstration mathématique rigoureuse ne peut prouver l'existence de soc_0 que tel que $\Delta(s(V, P_{ACC}, soc_0)) < \epsilon$ avec $0 < \epsilon < 1$ (comme une recherche dichotomique dans le domaine continu [Lou02]).

Soit $\epsilon > 0$.

Considérons une stratégie s vérifiant les conditions 0 et 0', et supposons l'existence de soc_i et $soc_i^{'}$ vérifiant les conditions 1 et 2.

Les valeurs d'état de charge soc_i et $soc_i^{'}$ des conditions 1 et 2 sont telles que $soc_i > soc_i^{'}$, sans quoi il existerait des instants où la conséquence de la condition 0 serait contredite. Notons $soc_{i_{h_1}} = soc_i$ et $soc_{i_{l_1}} = soc_i^{'}$, et :

$$soc_{f_{h_1}} = soc_{i_{h_1}} + \Delta(s(V, P_{ACC}, soc_{i_{h_1}}))$$
$$soc_{f_{l_1}} = soc_{i_{l_1}} + \Delta(s(V, P_{ACC}, soc_{i_{l_1}}^{'}))$$

Soit $soc_{i_1} \in]soc_{i_{l_1}}, soc_{i_{h_1}}[$ et $soc_{f_1} = soc_{i_1} + \Delta(s(V, P_{ACC}, soc_{i_1}))$ (figure 11.3).

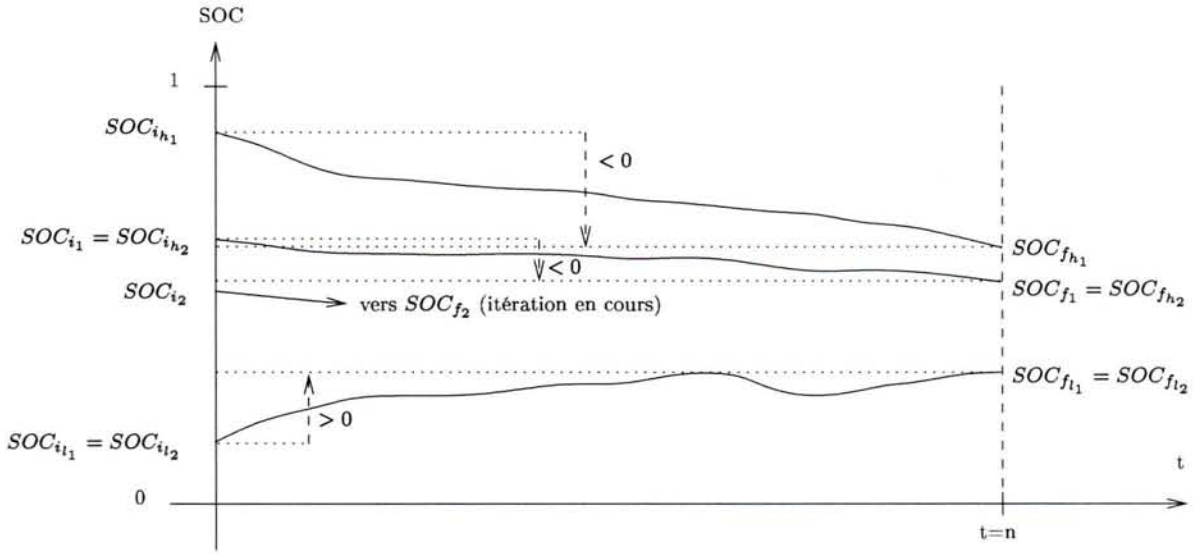


FIG. 11.3: *Notations employées dans la preuve de la propriété 2*

Examinons d'abord le cas où par exemple les courbes d'état de charge $s(V, P_{ACC}, soc_{i_{l_1}})$ et $s(V, P_{ACC}, soc_{i_1})$ se rejoignent. D'après la propriété 1 (vérifiée puisque les conditions 0 et 0' y sont par hypothèse), $s(V, P_{ACC}, soc_{i_{l_1}})$ et $s(V, P_{ACC}, soc_{i_1})$ sont alors confondues jusqu'à la fin du cycle. Écartons d'emblée ce cas qui ne modifie pas les idées de la démonstration suivante.

D'après 11.2, on a :

$$soc_{f_{l_1}} \leq soc_{f_1} \leq soc_{f_{h_1}} \tag{11.4}$$

et d'après 11.3 :

$$\begin{aligned} soc_{f_{h_1}} - soc_{f_1} &\leq soc_{i_{h_1}} - soc_{i_1} \\ soc_{f_1} - soc_{f_{l_1}} &\leq soc_{i_1} - soc_{i_{l_1}} \end{aligned} \tag{11.5}$$

Dans 11.5, l'égalité est obtenue si la stratégie décharge (resp. recharge) la batterie de manière identique sur le cycle V, pour les états de charge initiaux $soc_{i_{l_1}}$ et soc_{i_1} et/ou soc_{i_1} et $soc_{i_{h_1}}$.

On pose alors $soc_{i_{l_2}}$ et $soc_{i_{h_2}}$ tels que :

- ▷ Si $\Delta(s(V, P_{ACC}, soc_{i_1})) > 0$, $soc_{i_{l_2}} = soc_{i_1}$ et $soc_{i_{h_2}} = soc_{i_{h_1}}$;
- ▷ Si $\Delta(s(V, P_{ACC}, soc_{i_1})) < 0$, $soc_{i_{l_2}} = soc_{i_{l_1}}$ et $soc_{i_{h_2}} = soc_{i_1}$ (cas de la figure 11.3) ;

Il suffit alors de choisir $soc_{i_2} \in]soc_{i_{l_2}}, soc_{i_{h_2}}[$ et d'appliquer à nouveau la stratégie s sur le cycle V, en partant de l'état de charge initial soc_{i_2}, constatant ainsi à nouveau les relations 11.4 et 11.5 aux bornes de l'intervalle dans lequel nous avons choisi soc_{i_2}. On montre par récurrence suivant ce schéma qu'il existe un entier n tel que $soc_{i_{h_n}} - soc_{i_{l_n}} < \epsilon$, ce qui est équivalent à $\Delta(s(V, P_{ACC}, soc_{i_n}) < \epsilon$.

Notons que la réciproque de la propriété 2 est vraie, dans la mesure où la stratégie n'est pas telle que quel que soit $soc \in [0; 1]$, $\Delta(s(V, P_{ACC}, soc) = 0$. Ce ne sera raisonnablement jamais le cas.

□

Propriété 3 Soit une stratégie s vérifiant les conditions 0 et 0'.

Soit un cycle V et une demande d'accessoires P_{ACC} tels que les conditions 1 et 2 de la propriété 2 sont vérifiées. Cette dernière implique alors l'existence de soc_0 tel que $\Delta(s(V, P_{ACC}, soc_0)) = 0$.

Considérons le comportement de s sur la concaténation de m fois le cycle V, à partir d'une valeur initiale d'état de charge soc_i. Notons $\Delta_m(s(V, P_{ACC}, soc_i))$ la différence d'état de charge entre le début et la fin du m^{ieme} cycle élémentaire V. Alors $\forall \epsilon > 0$ il existe un nombre entier m_0 tel que pour tout m supérieur à m_0, $\Delta_m(s(V, P_{ACC}, soc_i) < \epsilon$, l'état de charge en début et fin du cycle élémentaire V_m étant égal à soc_0 à ϵ près.

Preuve Elle s'inspire des idées permettant de démontrer la propriété 2. Pour une valeur soc_i d'état de charge initial sur un cycle élémentaire V, il suffit d'appliquer 11.3 :

$$\begin{aligned} \Delta(s(V, P_{ACC}, soc_i)) &< \Delta(s(V, P_{ACC}, soc_0) \text{ si } soc_i > soc_0 \\ \Delta(s(V, P_{ACC}, soc_i)) &> \Delta(s(V, P_{ACC}, soc_0) \text{ si } soc_i < soc_0 \end{aligned}$$

soit :

$$\Delta(s(V, P_{ACC}, soc_i)) < 0 \text{ si } soc_i > soc_0$$
$$\Delta(s(V, P_{ACC}, soc_i)) > 0 \text{ si } soc_i < soc_0$$

La suite de réels constituée par l'état de charge au début du m^{ime} cycle élémentaire est donc croissante (resp. décroissante), et majorée (resp. minorée). Donc elle converge. On montre par l'absurde que sa limite est soc_0.

□

Concrètement, cela signifie que pour une stratégie s respectant les conditions 0 et 0', tout cycle (V, P_{ACC}) vérifiant les conditions 1 et 2 est tel que sa répétition à l'infini assure une stabilité de l'état de charge batterie.

Ceci amène la définition suivante :

Définition 2 : CONTRÔLE ASYMPTOTIQUE DE L'ÉTAT DE CHARGE Soit un véhicule, son architecture et son dimensionnement. Soit un cycle de conduite vitesse-temps et une demande accessoires donnés (V, P_{ACC}). La plage conseillée d'utilisation de la batterie $[soc_{min}; soc_{max}]$ est connue. On dit qu'une stratégie de gestion contrôle asymptotiquement l'état de charge de la batterie sur le cycle (V, P_{ACC}) considéré, si au bout d'un certain nombre de répétitions de ce cycle, le profil d'état de charge est tel que sa valeur en début de cycle élémentaire est égal à sa valeur en fin de cycle (à une précision près).

□

La définition 2 autorise donc des instants de fonctionnement en mode dégradé. Il s'agit de « contrôle asymptotique », par opposition au « contrôle large » que nous avons défini dans le paragraphe précédent (§11.3.2.1).

Une stratégie s vérifiant les conditions 0 et 0' étant fixée, notons $\mathcal{V}(s)$ l'ensemble des cycles tels que s y assure les conditions 1 et 2.

Il peut être intéressant de se demander si la concaténation de deux cycles (v_1, P_{ACC_1}) et (v_2, P_{ACC_2}) appartenant à $\mathcal{V}(s)$ appartient elle-même à $\mathcal{V}(s)$.

Propriété 4 Soit une stratégie s vérifiant les condition 0 et 0'. Si deux cycles (v_1, P_{ACC_1}) et (v_2, P_{ACC_2}) appartiennent à l'ensemble $\mathcal{V}(s)$ des cycles vérifiant les conditions 1 et 2, alors leur concaténation appartient à $\mathcal{V}(s)$.

Preuve Il suffit d'appliquer la propriété 2 à la concaténation de V_1 et V_2 (notée V_{1+2}). Notons soc_{0_1} et soc_{0_2} les valeurs de soc_0 pour les cycles V_1 et V_2. Si l'on applique s à partir de l'état de charge maximal soc_{max} de la plage d'utilisation de la batterie, l'existence de soc_{0_1} (par définition inférieur strictement à soc_{max}) et la propriété 1 nous assurent que $\Delta(s(V_1, P_{ACC}, soc_{max})) < 0$. Deux cas sont alors possibles :

1. soc_{0_2} est inférieur à $soc_{max} + \Delta(s(V_1, P_{ACC}, soc_{max}))$. Dans ce cas :

$$\Delta(s(V_2, P_{ACC}, soc_{max} + \Delta(s(V_1, P_{ACC}, soc_{max})))) < 0$$

   Or, $\Delta(s(V_2, P_{ACC}, soc_{max} + \Delta(s(V_1, P_{ACC}, soc_{max})))) = \Delta(s(V_{1+2}, P_{ACC}, soc_{max}))$. Donc $\Delta(s(V_{1+2}, P_{ACC}, soc_{max})) < 0$. La condition 1 d'application de la propriété 2 pour le cycle V_{1+2} est vérifiée ;

2. soc_{0_2} est supérieur à $soc_{max} + \Delta(s(V_1, P_{ACC}, soc_{max}))$. L'état de charge va alors remonter durant le cycle V_2 : $\Delta(s(V_2, P_{ACC}, soc_{max} + \Delta(s(V_1, P_{ACC}, soc_{max})))) > 0$. Raisonnons par l'absurde : supposons que l'état de charge final ne soit pas strictement inférieur à soc_{max}, c'est-à-dire que la courbe $s(V_{1+2}, P_{ACC}, soc_{max})$ atteint soc_{max}. Elle coupe nécessairement la courbe $s(V_2, P_{ACC}, soc_{0_2})$, puisque $soc_{max} + \Delta(s(V_1, P_{ACC}, soc_{max})) < soc_{0_2} < soc_{max}$. En effet, par définition de soc_{0_2}, on a $\Delta(s(V_2, P_{ACC}, soc_{0_2})) = 0$. Or, d'après la propriété 1, ceci est impossible, car deux courbes de s qui se rejoignent, sont par la suite confondues. Par suite, $\Delta(s(V_{1+2}, P_{ACC}, soc_{max})) < 0$, la condition 1 d'application de la propriété 2 est vérifiée.

Par un raisonnement symétrique, on montre que la condition 2 de la propriété 2 est également vérifiée. Son application démontre alors la propriété 4.

□

La propriété 4 est intéressante dans la mesure où elle nous assure la tenue en état de charge de la batterie sur toute concaténation de cycles quelconques (V, P_{ACC}) appartenant à $\mathcal{V}(s)$. Précisons que la stabilité d'état de charge sera vérifiée aux débuts et fins des divers profils élémentaires de vitesse véhicule, mais que cela n'exclut pas des plages de fonctionnement en mode dégradé.

Ainsi, si l'on montre que des cycles représentatifs de l'usage réel d'un véhicule appartiennent à $\mathcal{V}(s)$, alors la stratégie de gestion du véhicule s pourra être jugée satisfaisante (voir §12.2.5.2 p.135)

Pour des cycles de type européen, les conditions 1 et 2 ne semblent pas être très exigeantes vis-à-vis de la stratégie considérée (supposée vérifiant les conditions 0 et 0'). Les choses sont différentes lorsqu'on teste un cycle de type urbain congestionné, et on devra a priori construire la stratégie de gestion du véhicule de manière à ce qu'elles soient vérifiées.

Note sur la condition 0' La condition 0' ne sera pas vérifiée si la stratégie s est influencée par des paramètres dont la constante de temps est non négligeable par rapport au temps d'échantillonnage T_e, par exemple :

▷ la température batterie ;
▷ l'état de charge batterie si celui-ci dépend des sollicitations passées via une loi de type Peukert.

Dans des conditions réelles, ces deux paramètres influent beaucoup sur les caractéristiques de la batterie, et donc sur la stratégie s. Mais précisons que les conditions 0 et en particulier 0' sont des conditions suffisantes, et pas forcément nécessaires pour la validité de la propriété 1. En particulier, la stabilisation asymptotique de l'état de charge batterie autour d'une valeur soc_0 s'observe sur les véhicules hybrides commercialisés [MSIS01, Dub02] ; ceci constitue d'ailleurs une méthode de mesure de la consommation à bilan batterie nul, comme nous l'avons vu en §4.1.2 p.50.

11.3.2.3 Technique d'élaboration des stratégies

Comme on l'a vu en §11.3.2.1, certaines stratégies proposées dans la littérature régulent l'état de charge de la batterie par rapport à une valeur de consigne soc_c. Les régulateurs proposés comprennent généralement un terme intégral.

Dans un premier temps, afin de ne pas introduire d' « effet retard » au sens de la condition 0' (et donc ne plus la respecter), il est préférable de ne pas introduire d'intégrateur dans le régulateur. Ce n'est pas une nécessité, mais ceci permet :

- ▷ de prédire que l'état de charge aura une convergence asymptotique sur un cycle vérifiant les conditions 1 et 2 ;
- ▷ de laisser une certaine liberté à l'état de charge, qui pourra dériver dans la plage d'utilisation de la batterie $[soc_{min}; soc_{max}]$. La contrainte lors de la conception de la stratégie sera d'obtenir un contrôle asymptotique de l'état de charge sur les cycles courants, et que les valeurs d'équilibre asymptotique se situent à l'intérieur de $[soc_{min}; soc_{max}]$.

A priori, cette relative liberté de l'état de charge permet lors de la conception de la stratégie une plus grande marge de manoeuvre concernant la baisse de la consommation de carburant sur le cycle.

Notons que s'il est difficile de contrôler l'état de charge sur certains cycles, il sera possible d'introduire un terme correctif de type proportionnel entre l'état de charge courant et l'état de charge visé soc_c. Ceci permet de rester dans le cadre de la condition 0', et a priori :

- ▷ si soc_0 existe, de déplacer la valeur de soc_0 vers soc_c ;
- ▷ dans le cas contraire, de favoriser le respect des conditions 1 et 2 de la propriété 2, c'est-à-dire l'existence de soc_0.

11.4 Analyse des résultats instantanés de KOALA concernant les condition 0 et 0'

Nous revenons ici sur les résultats d'optimisation globale hors ligne donnés par KOALA. En effet, il est intéressant d'examiner si les stratégies correspondantes respectent ou non :

- ▷ la condition 0, à savoir la recharge (resp. décharge) d'autant plus grande que l'état de charge est bas (resp. haut), pour une même valeur de vitesse à la roue et de puissance des accessoires ;
- ▷ la condition 0', à savoir la répétabilité de la répartition entre le moteur thermique et le moteur électrique pour une même valeur de vitesse à la roue, de puissance des accessoires, et d'état de charge courant.

Notons d'abord que ceci impose de comparer ce qui est comparable, c'est-à-dire des conditions de fonctionnement identiques sur le cycle (V, P_{ACC}) considéré. Il est donc préférable d'examiner les résultats sur des cycles comprenant un nombre suffisant de points de vitesse et couple à la roue identiques (la puissance des accessoires est supposée constante). Cela sera rarement le cas sur des cycles d'usage réel. Nous considérons donc ici le cycle européen (NEDC). Les résultats sont détaillés en annexe N p.199. Ils font apparaître que :

- ▷ la condition 0 n'est que très rarement non vérifiée ;
- ▷ sur les cycles considérés, la stratégie est presque toujours bijective, c'est-à-dire qu'à un point du cycle (V, P_{ACC}) considéré, la répartition entre les deux machines est presque toujours la

même. Et ce, malgré les différences d'état de charge instantané, ce qui est plus large que la condition 0'. Lorsque les états de charge instantanés sont identiques, la répartition entre les deux machines est identique. On peut donc affirmer que, sur le cycle NEDC, la condition 0' est vérifiée .

Supposons que l'on essaie de reproduire en ligne les stratégies optimales obtenues hors ligne, ce qui sera l'objet du chapitre suivant. Si en toute rigueur, il suffit d'un instant où la stratégie optimale ne vérifie pas les conditions 0 et 0' pour rendre inutilisables les propriétés précédemment énoncées, il n'en reste pas moins que la vérification « presque tout le temps » nous permet d'attendre vraisemblablement un comportement de type convergence asymptotique sur des cycles vérifiant les conditions 1 et 2.

Supposons qu'effectivement les propriétés 1 à 4 précédemment énoncées sont vérifiées par les résultats d'optimisation globale sur les cycles envisagés. Alors le contrôle asymptotique de l'état de charge sur des cycles d'usage réel correspondant à un usage donné (e.g. cycles HYZEM urbain, routier, autoroutier), pris individuellement, nous assurera également le contrôle de l'état de charge sur des combinaisons de ceux-ci, c'est-à-dire pour tout usage moyen[54] du véhicule.

Notons que pour un usage extrême, il faudra prévoir un fonctionnement d'urgence, comme déjà évoqué en §11.3.1 p.121.

[54] i.e. non extrême, voir §3.3 p.44.

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11
54601 VILLERS-LES-NANCY CÉDEX

Chapitre 12

Stratégie en ligne établie systématiquement à partir des résultats de l'optimisation globale

12.1 Cadre de la démarche proposée

Dans le chapitre précédent, nous avons examiné l'état de l'art concernant les stratégies de gestion en ligne pour les véhicules hybrides thermiques électriques. Nous avons également donné des conditions suffisantes au contrôle asymptotique de l'état de charge sur un cycle (V, P_{ACC}) donné, et évoqué la possibilité de réguler l'état de charge courant par rapport à un état de charge de consigne soc_c.

Suite au travail d'analyse des résultats fournis par KOALA (§11.2.2.3 p.118), nous avons entrepris la mise au point de stratégies, d'une part établies par rapport aux résultats de cette analyse, et d'autre part comprenant un régulateur d'état de charge. Nous avons été confrontés au problème du réglage des divers paramètres du régulateur (proportionnel, intégrateur, etc.), ce réglage devant de plus être effectué pour chaque dimensionnement de véhicule considéré (§11.2.2.4 p.121). L'élaboration de lois expertes se heurte également à la justification des choix effectués.

Dans ce contexte, notre regard s'est porté vers une élaboration *systématique* de lois en ligne, c'est-à-dire nécessitant le moins de réglage possible.

L'approche qui a été adoptée utilise la théorie des réseaux de neurones.

Cette approche reste a priori valable pour n'importe quel niveau d'hybridation et dimensionnement du véhicule.

12.2 Approche par réseaux de neurones

12.2.1 Présentation des réseaux de neurones artificiels

Les réseaux de neurones artificiels sont utilisés principalement dans le domaine du traitement du signal, afin d'extraire l'information utile du bruit. Par exemple, dans le domaine de la reconnaissance de forme (e.g. reconnaissance de caractères).

12.2.2 Modèle mathématique de McCulloch et Pitts

À la suite des premiers travaux concernant l'étude du fonctionnement microscopique du cerveau, Mc Culloch et Pitts ont proposé en 1943 un modèle de neurones qui fait encore référence aujourd'hui, représenté en figure 12.1 [BV96].

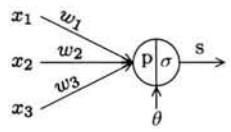


FIG. 12.1: *Modèle de neurone selon Mc Culloch et Pitts*

Le neurone est constitué de trois parties :

- ▷ des liaisons d'entrées, ou SYNAPSES. Chaque synapse est plus ou moins conductrice du signal d'entrée x_i via un poids synaptique w_i. Si w_i est négatif, la synapse sera dite inhibitrice, dans le cas contraire elle sera dite excitatrice ;
- ▷ une liaison de sortie, ou AXONE ;
- ▷ un SOMA, c'est-à-dire le coeur du neurone. Celui-ci effectue la somme pondérée des entrées x_i du neurone par les coefficients synaptiques w_i, ce qui donne une activation $a(x) = w^t \cdot x$. Cette activation est traitée par le soma pour donner la sortie s, via une fonction de décision σ.

  Généralement, σ est une fonction de type sigmoïde (e.g. tangente hyperbolique), avec un seuil de déclenchement h :
  $$\sigma : x \mapsto \tanh(x - h)$$
  Finalement, la sortie du neurone est donné par
  $$a(x) = \sigma(w^t \cdot x)$$

12.2.3 Réglage des coefficients synaptiques : loi de Hebb

Chaque entrée ayant une signification physique bien particulière, deux idées principales sont à la base de la théorie des réseaux de neurones :

- ▷ d'une part, l'association des neurones[55] . Un réseau de neurones peut être vu comme un graphe orienté dont les sommets sont les somas, et les arcs orientés les synapses ou axones. Un neurone ne contient qu'une parcelle infime de l'information détenue par le réseau (on dit que l'information est distribuée) ;
- ▷ d'autre part, le fait de pouvoir restituer des associations entrée-sortie réalisées lors d'un APPRENTISSAGE, lors d'une phase D'UTILISATION. Ceci est réalisé par le réglage des coefficients synaptiques lors de l'apprentissage ; un moyen de réglage a été proposée par D. Hebb en 1949.

Il existe un grand nombre de types de réseaux de neurones, parfois non basés sur le modèle de McCulloch et Pitts. De manière générale, on oppose [BV96] :

- ▷ les réseaux plutôt dédiés à *l'approximation* à ceux dédiés à la *classification*. Supposons que l'apprentissage consiste en un ensemble de couples $(x; f(x))$ caractéristiques d'une fonction

[55] Le cerveau compte environ 10 milliards de neurones, chacun connecté avec quelques milliers d'autres.

f. L'approximation consiste à donner une valeur interpolée entre $f(x_1)$ et $f(x_2)$ pour un x compris entre x_1 et x_2, tandis que la classification consiste à renvoyer $f(x_1)$ ou $f(x_2)$ suivant que x est plus proche de x_1 ou de x_2 ;

- ▷ les réseaux à *structure figée* avant apprentissage (nombre de neurones fixés) à ceux donc la structure est *évolutive* (création d'autant de neurones que nécessaire lors de l'apprentissage) ;
- ▷ les réseaux qui partagent le plan d'entrée via par exemple un hyperplan (*PLS : Piecewise Linear Separation*) (e.g. réseau de type perceptron), à ceux qui définissent des *régions d'influence* (ROI : Region Of Influence) en certains endroits de l'espace d'entrée (e.g. réseau à fonctions radiales de base) ;
- ▷ les réseaux *supervisés* (e.g. réseau de type perceptron) aux réseaux *non supervisés* (e.g. réseau de Kohonen). Dans un réseau supervisé, la phase d'apprentissage est caractérisée par le fait qu'à chaque entrée est associée une sortie, contrairement aux réseaux non supervisés où le réseau s'auto-organise d'une manière dépendante des caractéristiques des grandeurs d'entrée du réseau ;
- ▷ les réseaux « *feedforward* » (e.g. perceptron) aux réseaux « *feedback* » comprenant des cycles (e.g. réseau de Hopfield) ;

La structure du réseau de neurones à choisir dépend du problème à traiter. Ceci tient à l'expertise du concepteur.

12.2.4 Définition des entrées et sorties du réseau

Notre but est de répliquer le comportement fourni par l'optimisation globale (i.e. les résultats fournis par KOALA) pour un fonctionnement en ligne. La première chose à faire est de définir quelles vont être les entrées et sorties du réseau de neurones. Celui-ci devra apprendre les résultats de l'optimisation globale et pouvoir les répliquer en ligne.

Le travail d'analyse des résultats d'optimisation globale détaillé en §11.2.2.3 p.118 nous a permis de définir les paramètres ayant une influence sur les résultats de l'optimisation :

- ▷ la différence d'état de charge à respecter entre le début et la fin du cycle ;
- ▷ la puissance instantanée à la roue, que nous avons choisi de scinder en couple et vitesse. Cela nous permet a priori d'obtenir plus d'informations quant aux résultats d'optimisation ;
- ▷ la puissance des accessoires.

Ces quatre paramètres P_{ACC}, ΔSOC_r, C_R et Ω_R seront les entrées du réseau. Comme sortie, nous choisissons la puissance à demander au moteur électrique, P_{ME} (figure 12.2).

Nous décidons de définir le rapport de boîte instantané k_{BV} séparément, comme ceci est le cas dans l'optimisation globale. Celui-ci sera également conséquence de l'analyse des résultats d'optimisation (figure 12.20 p.152).

12.2.5 Précisions concernant l'entrée état de charge

12.2.5.1 Signification de l'entrée état de charge lors de l'apprentissage puis l'utilisation

Les résultats fournis par le logiciel d'optimisation globale KOALA sont à ΔSOC_r fixé entre le début et la fin du cycle. Par exemple, la succession de commande sur un cycle à $\Delta SOC_r = -20\%$

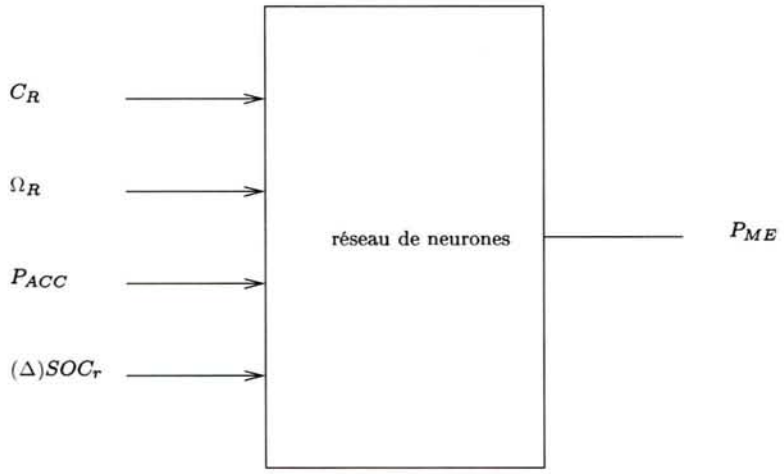


FIG. 12.2: *Entrées et sorties du réseau*

favorisera plutôt l'utilisation du moteur électrique en traction (mode tout électrique et boost) que sur le même cycle à $\Delta SOC_r = 0\%$.

En ligne, on ne connaît pas la différence d'état de charge entre le début et la fin du cycle. Si l'état de charge courant est inférieur à la valeur de consigne : $SOC = soc_c - 0.2 \cdot C_B$, et si l'on veut se rapprocher de soc_c, il faut appliquer une succession de commandes permettant de recharger la batterie. La question est de savoir si l'on veut que la recharge se fasse relativement vite, ou bien plus lentement ; ceci est l'enjeu du réglage des coefficients du régulateur habituellement utilisé (voir §11.3.2.1 p.121). Pour ces régulateurs, l'éloignement de l'état de charge de consigne signifie un terme proportionnel et surtout intégral qui enflent généralement très vite, éventuellement au détriment de la consommation. Cependant, il est bel et bien nécessaire de fixer un état de charge préférentiel, sans quoi l'état de charge batterie ne ferait que dériver.

Voici la démarche que nous avons adoptée :

- ▷ lors de l'apprentissage, l'entrée « état de charge » du réseau de neurones signifie « différence d'état de charge sur le cycle considéré » ;
- ▷ lors de l'utilisation, l'entrée « état de charge » signifie « moins l'état de charge courant ».

Voici un exemple. Plaçons-nous dans le cas où le cycle considéré en ligne est le cycle d'apprentissage, et qu'on le répète le nombre de fois désiré. Cela signifie que si l'état de charge courant est $SOC = soc_c - 0.2 \cdot C_B$, le réseau de neurones appliquera la commande correspondant à l'apprentissage réalisé à $\Delta SOC_r = +20\%$, ce qui tend à le faire revenir à l'état de charge de consigne en un cycle. Par la suite, il appliquera la commande correspondant à $\Delta SOC_r = 0$, l'état de charge asymptotique valant alors soc_c. Cela nous assure une consommation optimale lors de la phase de retour à soc_c, puis lors du travail à ΔSOC nul sur le cycle.

Néanmoins, lorsque l'apprentissage est réalisé sur plusieurs cycles différents, les commandes optimales correspondant aux divers cycles pourront interférer. Dans ce cas, l'état de charge dérivera, mais si les conditions 1 et 2 du chapitre 11 sont vérifiées par le cycle, on observera un contrôle asymptotique de celui-ci. Et ce, sans chercher à ramener l'état de charge à une valeur de consigne soc_c. C'est pourquoi dans notre cas, nous préférons nommer la valeur de consigne d'état de charge soc_c, valeur « préférentielle ».

12.2.5.2 Choix du cycle et rapport à la distance

Une question se pose quant à savoir quels cycles choisir pour l'apprentissage. Étant donné que le véhicule hybride sera utilisé en conditions d'usage réel, il est légitime de réaliser l'apprentissage sur des cycles d'usage réel. Nous utiliserons donc comme jeux de cycles certains issus des études ARTEMIS ou HYZEM [And97, And02] :

▷ apprentissage sur ARTEMIS urbain, routier, et autoroutier ;
▷ ou apprentissage sur HYZEM urbain, routier, et autoroutier.

Ainsi, chaque apprentissage couvrira a priori l'ensemble des usages possibles du véhicule. Vu la propriété 4 du chapitre 11, ceci nous assurera, dans le cas du contrôle asymptotique de l' état de charge sur ces cycles, le contrôle en état de charge sur une combinaison de ceux-ci, c'est-à-dire pour tout usage non extrême du véhicule.

Chacun des cycles sera calculé dans KOALA pour neuf ΔSOC_r différents variant de -40% à +40% d'état de charge, avec un pas de 10%[56]. Une fois l'apprentissage réalisé, on comparera les résultats obtenus en terme de consommation pour les deux apprentissages considérés.

Cependant, il est important de noter que réaliser 30% de recharge sur un cycle européen n'a pas la même signification que réaliser 30% de recharge sur un cycle de type urbain. En effet, la distance totale considérée n'est pas la même (e.g. 11022 m pour un cycle NEDC, 3470m pour un HYZEM urbain). Cela revient donc à recharger la batterie plus vite sur le cycle HYZEM urbain que sur le cycle NEDC ($\Delta SOC/\text{km}$ plus important sur le cycle HYZEM).

Une première idée est d'introduire un facteur multiplicatif de telle manière que la valeur en $\Delta SOC/\text{km}$ des deux cycles soit comparable. Mais si l'on pousse la comparaison jusqu'au bout, ceci n'est toujours pas satisfaisant, puisque ces deux cycles correspondent à des sollicitations de la chaîne de traction complètement différentes. Il semble en effet plus délicat de recharger de 30% la batterie sur un cycle HYZEM urbain, naturellement propice à l'utilisation du moteur électrique, que sur un cycle autoroutier où celle-ci pourra être accomplie en réalisant un flux série continuel. L'augmentation relative de consommation de carburant la plus forte sera donc a priori à attribuer au cycle HYZEM urbain. On pourrait dans ce cas diminuer la valeur en $\Delta SOC/\text{km}$ pour ce dernier, afin de tenir compte de son caractère propice au moteur électrique. Mais cela constitue un paramètre de réglage supplémentaire.

Dans ces conditions, nous décidons de considérer les $\Delta SOC/\text{km}$ des cycles de la base d'apprentissage « tels quels ».

12.2.6 Réseau de neurones et conditions d'application des propriétés 1 à 4 du chapitre 11

Nous avons vu en §11.4 que les résultats d'optimisation globale fournis par KOALA semblent très majoritairement respecter les conditions 0 et 0', nécessaires à l'application des propriétés 1 à 4 évoquées dans le chapitre 11(§11.3.2.2 p.122).

Dans ces conditions, on peut affirmer que si l'apprentissage est réalisé de manière satisfaisante, alors la stratégie en ligne par réseaux de neurones vérifiera autant la condition 0 que la vérifient (ou pas) les résultats de KOALA servant comme base d'apprentissage.

[56] Pour des variations d'état de charge importantes (ex. 40%), ceci peut a priori remettre en question l'hypothèse de la tension à vide et la résistance batterie supposées constantes (cf §9.5 p.93).

En revanche, la condition 0' est vérifiée par construction, puisque le réseau de neurones est une fonction, c'est-à-dire qu'à chaque vecteur d'entrée correspond une seule sortie (contrairement à KOALA qui de par son aspect d'optimisation globale peut renvoyer deux sorties différentes pour le même vecteur d'entrée).

Pour réaliser l'apprentissage des résultats d'optimisation globale, deux réseaux de neurones ont été considérés : un réseau d'approximation de type perceptron multicouche (utilisant le modèle mathématique de McCulloch et Pitts), et un réseau de classification de type réseau à fonctions radiales de base. L'apprentissage effectué pour le perceptron multicouche n'ayant pas été concluant, nous présentons ici la démarche et les résultats obtenus avec le réseau à fonctions radiales de base. Ce dernier utilise un modèle de neurone différent de celui de McCulloch et Pitts.

12.2.7 Réseau RBF-DDA

12.2.7.1 Introduction

Parmi les réseaux de type « Region Of Influence », le réseau RCE (« Restricted Coulomb Energy ») consiste à construire lors de l'apprentissage des régions de taille limitée dans l'espace autour des vecteurs d'apprentissage (structure évolutive). Dans ce type d'algorithme, la couverture de l'espace par le réseau n'est que partielle : il existe des zones mortes où à priori le réseau n'est pas capable de fournir une sortie pertinente.

Dans ces conditions, il paraît intéressant d'introduire des zones dont les limites sont progressives, voire inexistantes. Ceci est possible en introduisant la notion de « degré d'appartenance » à une zone, de la même manière qu'existe le « degré d'appartenance » à une catégorie en logique floue [BM99].

Plaçons-nous dans le cadre d'un réseau de classification. Dans ce cas, chaque zone d'influence correspondra à une catégorie donnée pour la sortie, chacune étant représentée par un neurone. Pour un point de l'espace d'entrée, le neurone le plus activé, c'est-à-dire celui qui sera tel que le degré d'appartenance correspondant sera le plus élevé, fournira la catégorie de la sortie.

12.2.7.2 Description générale

Le réseau à fonctions radiales de base avec ajustement dynamique des fonctions d'appartenance (« Radial Basis Functions with Dynamic Decay Adjustment », RBF-DDA) correspond à un réseau RCE avec limites progressives. Voici ses caractéristiques :

- ▷ réseau de classification ;
- ▷ réseau supervisé ;
- ▷ type « region of influence » ;
- ▷ structure évolutive, à une couche cachée ;
- ▷ « feedforward ».

12.2.7.3 Classification bayesienne

Le réseau de neurones RBF-DDA permet de réaliser de la classification bayesienne[57] :

[57] Voir annexe O p.223.

▷ chaque vecteur d'apprentissage définit une zone d'influence d'un certain rayon, et dont la fonction d'appartenance correspondante tient compte du nombre de vecteurs d'apprentissage de même catégorie situés dans la même zone ;
▷ chaque neurone de sortie correspond à une catégorie donnée, le neurone le plus activé (c'est-à-dire à l'activation maximum) fournit la catégorie du vecteur en entrée du réseau ;

12.2.7.4 Réalisation pratique

Phase de construction du réseau : apprentissage Nous allons décrire le procédé de construction des zones d'influence du réseau, pour un exemple simple :

▷ le vecteur d'entrée est réel, à une dimension. Le réseau comprendra donc un neurone d'entrée ;
▷ deux catégories sont possibles, la catégorie A et la catégorie B. Le réseau comprendra donc deux neurones de sortie.

Les degrés d'appartenance aux deux catégories sont notés $p_A(x)$ et $p_B(x)$. Nous reprenons les schémas explicatifs utilisés dans le manuel de SNNS (figure 12.3).

Notons que nous définissons deux paramètres θ^- et θ^+, de telle manière que lorsque l'apprentissage est terminé, les caractéristiques des neurones de la couche cachée entraînent que l'ensemble des vecteurs d'apprentissage soient tels :

▷ qu'un vecteur de classe A appartienne à cette classe avec un degré d'appartenance au moins égal à θ^+ ;
▷ que l'ensemble des vecteurs concurrents (i.e. de classe B) aient un degré d'appartenance à la classe A inférieur à θ^-.

Ceci permet de s'assurer qu'un vecteur d'apprentissage de classe A appartenant à la zone d'influence d'un neurone de classe A déjà existant, mais avec un degré d'appartenance faible, donne bien lieu à la création d'un nouveau neurone et donc d'une nouvelle zone d'influence. Dans le cas contraire, un vecteur proche d'un vecteur de la base d'apprentissage pourrait être classé comme étant de la catégorie concurrente à ce dernier.

Les vecteurs d'apprentissage sont présentés successivement au réseau, entraînant ou non la création de neurones dans la couche cachée initialement vide (figure 12.3) :

▷ en étape 1, un vecteur de classe A est présenté au réseau. Un neurone de classe A, c'est-à-dire relié au neurone de sortie correspondant à la classe A, est créé dans la couche cachée, à l'abscisse égale à celle au vecteur présenté, c'est-à-dire x_1. La fonction d'appartenance utilisée est une gaussienne, comme c'est le cas dans les réseaux à fonctions radiales de base classiques. Le maximum de la fonction d'appartenance est un puisqu'il s'agit du premier vecteur de cette classe ;
▷ en étape 2, un vecteur de classe B est présenté. Aucun neurone de classe B n'existe encore, donc un neurone de classe B est ajouté dans la couche cachée, à l'abscisse x_2. L'écartement (i.e. l'écart-type) de la gaussienne introduite en étape 1 est ajusté de manière à ce que le vecteur de classe B appartienne à celle-ci avec un degré d'appartenance égal à θ^-. Idem pour la gaussienne nouvellement introduite ;
▷ en étape 3 est présenté un vecteur de classe B, dont le degré d'appartenance à la gaussienne introduite dans l'étape 2 est supérieur à θ^+. Il n'y a donc pas besoin d'introduire une nouvelle gaussienne. Cependant, afin de réaliser une classification bayesienne, il faut tenir compte du nombre de réalisations de chaque catégorie. Dans ces conditions, la gaussienne correspondante

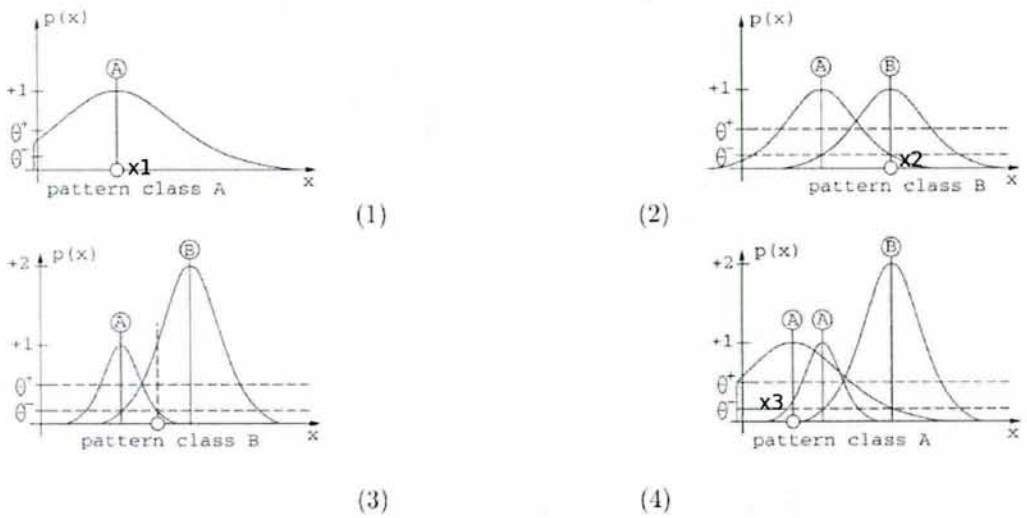


FIG. 12.3: *Construction du réseau RBF-DDA sur un cas simple*

est modifiée de manière à ce que son degré d'appartenance maximum soit incrémenté d'une unité, ici donc il doit être égal à 2. L'écart-type de la gaussienne est également ajusté afin de respecter la condition sur θ^-.

▷ en étape 4, un vecteur de classe A est présenté au réseau. Celui-ci est tel que son degré d'appartenance à la gaussienne introduite en étape 1 est inférieur à θ^+. Il est donc nécessaire d'introduire un nouveau neurone dans la couche caché en x_3, correspondant à une gaussienne de classe A. Dans le cas présent, l'écart-type des deux autres gaussiennes n'a pas besoin d'être ajusté.

Le réseau découlant de cet apprentissage est représenté sur la figure 12.4. Il peut être assimilé à un graphe orienté :

▷ les abscisses des gaussiennes (i.e. des neurones de la couche cachée) sont représentées par les coûts associés aux arcs entre le neurone d'entrée et les neurones de la couche cachée correspondants ;

▷ le nombre de réalisation de chaque catégorie est représenté par un entier associé à chaque arc entre la couche cachée et la couche de sortie ;

▷ à chaque neurone de la couche cachée est associé l'écart-type de la gaussienne correspondante.

Les courbes représentées sur la figure 12.3 correspondent donc à la multiplication des fonctions d'appartenance par le coût de l'arc entre la couche cachée et la couche de sortie.

Notons que d'après [BD95], la valeur de θ^- et θ^+ influe peu sur les résultats obtenus.

Phase d'utilisation du réseau Pour les notations précisées sur la figure 12.4, et pour une entrée égale à x, le réseau permet de catégoriser x, selon :

$$c(x) = \arg \max_{i=A,B} p_i(x)$$

Note Lorsqu'on place un vecteur ayant servi à l'apprentissage en entrée du réseau de neurones, et que progressivement on éloigne l'une de ses composantes dans une direction où il n'existe pas de vecteurs d'apprentissage, la sortie restera toujours la même. Cela a son importance quand on se place à même valeur de couple roue, vitesse roue, et puissance accessoires, mais qu'on se situe au-delà de la dernière valeur de ΔSOC_r ayant servie à l'apprentissage.

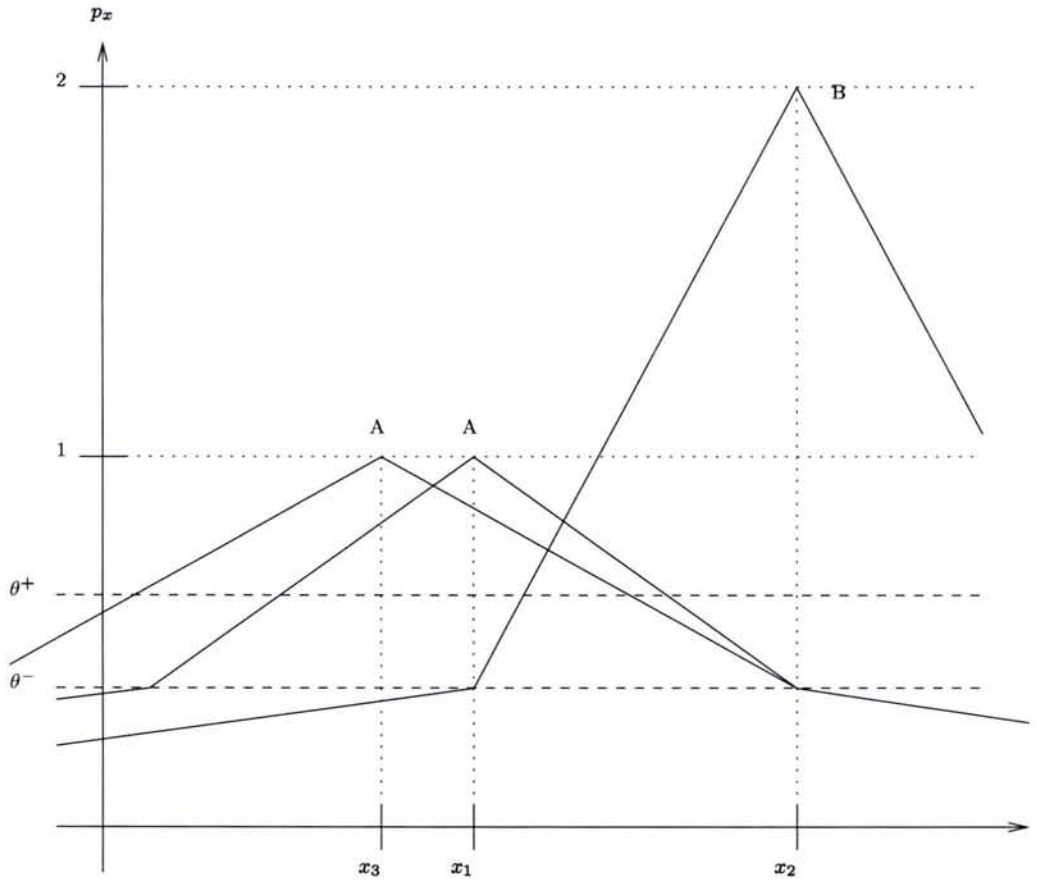


FIG. 12.6: *Modification des fonctions d'appartenance de manière à pouvoir généraliser à l'infini*

12.2.7.6 Normalisation des entrées

Vu l'aspect radial des fonctions d'appartenance choisies, il est nécessaire de normaliser les composantes du vecteur d'entrée. En effet, dans le cas contraire, le nombre de neurones nécessaire pour couvrir l'espace d'entrée augmenterait fortement.

12.2.7.7 Méthodes d'élagage

De manière générale dans le domaine des réseaux de neurones, il existe des méthodes permettant de modifier la structure du réseau, de manière à diminuer le nombre de neurones en couche

cachée, sans pour autant diminuer les performances de l'ensemble. On les nomme méthodes d' élagage. Elles consistent à supprimer des neurones ou bien des connexions jugées peu utiles.

Le réseau de neurones étant amené à être implémenté sur une carte DSPACE dont la mémoire vive est relativement limitée, ces méthodes pourraient se révéler intéressantes.

12.3 Utilisation du réseau RBF-DDA dans le problème de la commande en ligne de VHTE

Nous avons défini en §12.2.4 les entrées et sorties du réseau de neurones :

- ▷ P_{ACC}, ΔSOC_r, C_R et Ω_R en entrée ;
- ▷ P_{ME} en sortie.

Pour pouvoir appliquer le réseau de classification RBF-DDA à ce problème, il est nécessaire de diviser la puissance du moteur électrique en un certain nombre de classes, c'est-à-dire la discrétiser :

- ▷ la première classe sera représentative de la puissance minimum du moteur électrique ;
- ▷ la dernière classe sera représentative de la puissance maximum du moteur électrique ;
- ▷ une classe intermédiaire sera représentative d'une puissance nulle au niveau du moteur électrique ;
- ▷ les autres classes seront représentées par leur centre.

Une étude de sensibilité concernant l'influence du nombre N de classes de puissance moteur électrique sur la qualité des résultats en phase d'utilisation a été effectuée. À la suite de celle-ci, nous avons choisi $N = 20$, pour un bon compromis entre nombre de neurones dans la couche cachée, et augmentation de la consommation de carburant entre l'apprentissage et l'utilisation.

12.4 Application backward en ligne dans KOALA

Afin de valider la démarche de conception de lois de gestion par réseaux de neurones, une première approche a été d'utiliser le modèle de véhicule de KOALA dans une version en ligne (il n'est donc plus question d'optimisation globale). Cela nous permet de comparer, à modèle équivalent, les résultats d'optimisation globale et ceux obtenus en ligne par réseaux de neurones, donc de quantifier la hausse de consommation due à la non-connaissance du parcours a priori.

Dans cette version en ligne de KOALA, les rapports sont optimisés instantanément, comme c'est le cas dans la version hors ligne de l'optimisation globale.

12.4.1 Reproduction de la courbe d'état de charge optimal sur un cycle NEDC

La figure 12.7 montre, en rouge, la courbe optimale d'état de charge relatif sur le cycle NEDC, à iso-état de charge entre le début et la fin du cycle. Dans ce paragraphe §12.4.1, l'apprentissage n'est effectué que par rapport à cette courbe, contrairement aux prochains paragraphes où l'apprentissage suivra les principes énoncés en §12.2.5, c'est-à-dire :

- ▷ réalisé pour un ensemble de cycles HYZEM ou ARTEMIS ;

▷ chaque cycle étant considéré à plusieurs variations d'état de charge entre le début et la fin du cycle.

Nous nous limitons ici à l'apprentissage par rapport à une seule courbe d'état de charge, afin de voir dans quelle mesure le réseau de neurones est capable de la reproduire. Le fait de ne réaliser l'apprentissage que pour un ΔSOC justifie de ne pas utiliser l'entrée état de charge du réseau de neurones en phase d'utilisation.

La réponse en phase d'utilisation est représentée en bleu sur la même figure 12.7. Elle se différencie de la courbe d'apprentissage pour les raisons suivantes :

▷ une décharge se réalise peu avant $t = 100\,\mathrm{s}$, ne figurant pas dans l'apprentissage. Cela s'explique du fait que le réseau de neurones réalise une classification bayesienne durant la phase d'apprentissage, et renvoie donc la classe la plus probable au sens bayesien en phase d'utilisation. En effet, les trois flèches placées sur la courbe d'apprentissage montrent trois paliers identiques réalisés en tout électrique par le véhicule, tandis que le premier (flèche verticale) est réalisé à moteur thermique en fonctionnement. Le fonctionnement sur ce palier en tout électrique est donc plus probable ; c'est pourquoi il est choisi par le réseau de neurones ;

▷ l'écart en SOC_r entre le réseau et la courbe d'apprentissage augmente encore jusqu'à la fin du cycle. Ceci est dû à la discrétisation en $N = 20$ classes de la puissance du moteur électrique ;

▷ la récupération est plus forte en phase d'utilisation qu'en phase d'apprentissage. Ceci est dû à la précision du graphe de l'optimisation globale dans KOALA : la courbe d'apprentissage sous-estime légèrement la capacité de récupération au freinage. L'erreur correspondante en terme de consommation de carburant a été étudiée en §9.2 p.91.

La hausse de consommation en phase d'utilisation par rapport à la phase d'apprentissage, c'est-à-dire par rapport à l'optimum fourni par KOALA, reste inférieure à 3%.

Notons que la décharge de la courbe fournie par le réseau de neurones sur le cycle peut nous laisser penser que l'état de charge d'équilibre asymptotique, s'il existe, serait atteint pour un SOC relatif négatif[61]. Ceci pourra être vérifié dans le prochain paragraphe §12.4.1.

À ce stade, on peut considérer la démarche par réseau de neurones prometteuse. Il reste néanmoins à valider son intérêt sur d'autres parcours, ainsi qu'avec des apprentissages comprenant plusieurs cycles.

12.4.2 Apprentissage sur HYZEM urbain, routier, autoroutier. Utilisation sur les mêmes cycles

Dans la suite, l'apprentissage est réalisé sur l'ensemble des cycles HYZEM : urbain, routier, et autoroutier, et à plusieurs états de charge, comme indiqué en §12.2.5.2 p.135. Ceci représente un apprentissage bien plus conséquent qu'en §12.4.1, et qui est susceptible de pouvoir contrôler l'état de charge sur n'importe quel cycle de type urbain, routier, ou autoroutier.

Une première étape est de vérifier que les résultats d'optimisation globale sont correctement reproduits, aux facteurs évoqués en §12.4.1 près.

Sur les figures 12.8 et 12.10, on a représenté en vert les courbes d'état de charge fournies par le réseau de neurones, pour un ΔSOC nul entre le début et la fin du cycle. Celui-ci est réalisé

[61] En réalité, l'entrée état de charge du réseau de neurones n'est ici pas utilisée, donc la sortie fournie serait inchangée sur la concaténation de plusieurs cycles NEDC. Cela ne sera plus vrai en §12.4.2, où il existera bel et bien un état de charge d'équilibre.

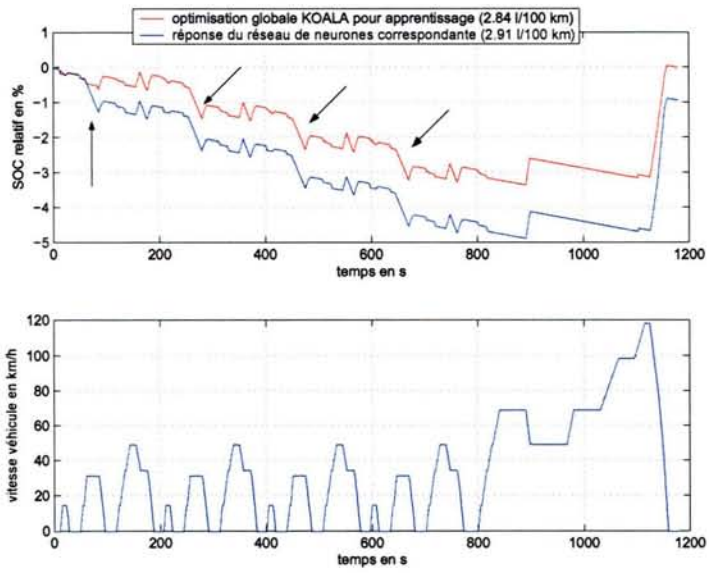


FIG. 12.7: *Apprentissage sur NEDC à un seul état de charge, réponse du réseau correspondante*

par dichotomie dans KOALA en ligne, dans le principe la même que celle qui nous avait permis de démontrer la propriété 2 en §11.3.2.2 p.122 ; il est par ailleurs atteint pour un certain état de charge d'équilibre soc_0. Nous avons représenté sur la figure 12.9 le comportement de l'état de charge sur vingt cycles HYZEM urbains concaténés, afin de montrer l'apparition d'un soc_0 d'équilibre égal au précédent ; cela montre l'équivalence des deux démarches (dichotomie et répétition du même cycle).

Sur les figures 12.8 et 12.10 sont représentées en bleu les courbes optimales fournies par KOALA (optimisation globale hors ligne) pour le même ΔSOC que les courbes données par KOALA en ligne (en l'occurrence, nul). Comme les résultats de l'optimisation globale ne dépendent pas de la valeur absolue de SOC, ces courbes bleues correspondent nécessairement à une des courbes d'apprentissage à $\Delta SOC = 0$:

▷ optimisation globale sur HYZEM urbain à $\Delta SOC = 0$ pour la figure 12.8 ;
▷ optimisation globale sur HYZEM routier à $\Delta SOC = 0$ pour la figure 12.10 ;

On peut constater que les formes d'état de charge de la courbe d'apprentissage sont assez fidèlement reproduites, ce qui entraîne des hausses de consommation limitées par rapport à l'optimum : 6% pour le cycle HYZEM urbain, 3% pour le cycle HYZEM routier.

12.4.3 Apprentissage sur HYZEM urbain, routier, autoroutier. Utilisation sur cycles ARTEMIS et NEDC

Une seconde étape est de vérifier que l'apprentissage sur cycles HYZEM fournit des résultats satisfaisants sur des cycles ne faisant pas partie de la base d'apprentissage. Cela peut être vérifié sur les figures 12.11, 12.12, 12.13 ; pour les cycles ARTEMIS urbain, ARTEMIS routier, et NEDC. Les hausses de consommation par rapport à l'optimum sont respectivement 6%, 4%, 4%. Notons

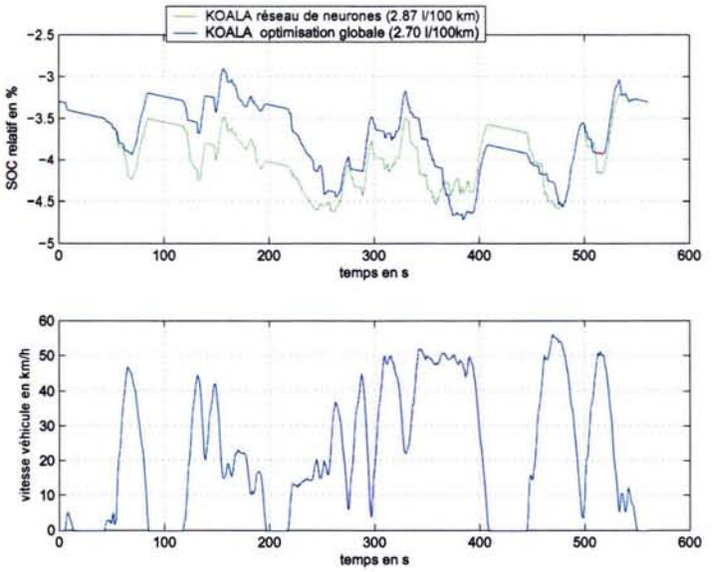


FIG. 12.8: *Apprentissage sur cycles HYZEM. Utilisation sur HYZEM urbain*

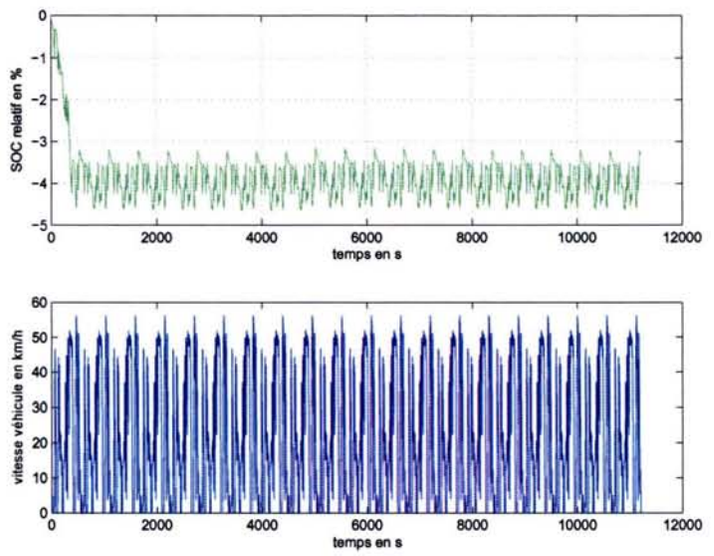


FIG. 12.9: *Apprentissage sur cycles HYZEM. Utilisation sur la concaténation de vingt cycles HYZEM urbain*

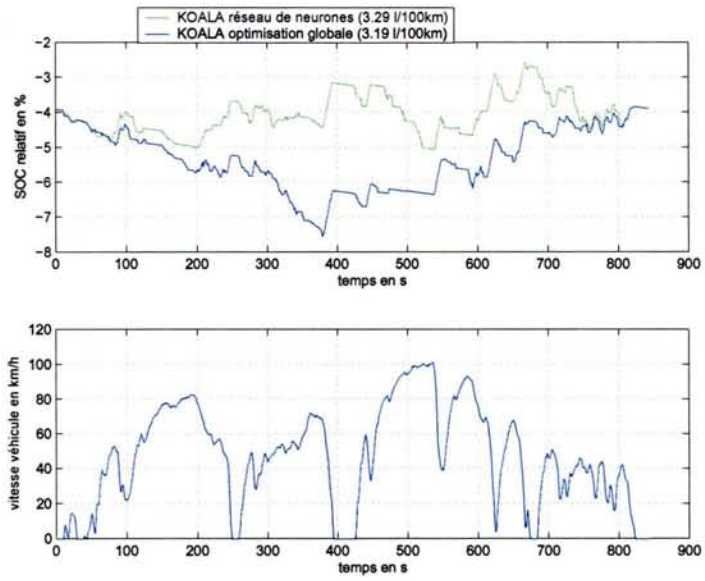


FIG. 12.10: *Apprentissage sur cycles HYZEM. Utilisation sur HYZEM routier*

que ces écarts entre optimum hors ligne et loi en ligne sont bien plus faibles que ceux présentés par exemple dans [Ven01] (pour un cycle routier, de l'ordre de 15%).

Sur le cycle NEDC, vers $t = 900$s, on remarque des oscillations au niveau de la courbe d'état de charge fournie par le réseau de neurones. Ceci est dû à un phénomène d'oscillation entre deux classes, par rapport à l'entrée SOC du réseau de neurones. En effet :

- ▷ le couple et la vitesse à la roue[62] sont strictement identiques sur tous les points en question ;
- ▷ du fait de la faible valeur de la variation d'état de charge, la sortie du réseau de neurones indique tantôt une classe correspondant à du flux série, tantôt une classe correspondant à une puissance nulle sur le moteur électrique. Ce qui correspond à une oscillation entre le courant de décharge des accessoires et un courant de recharge de la batterie (d'où l'impression visuelle d'obtenir un courant nul sur la plage de temps concernée).

Lorsque le couple et la vitesse à la roue varient à chaque seconde, ce phénomène d'oscillation a moins de chances d'arriver. C'est pourquoi :

- ▷ nous ne l'avons pas observé sur les cycles d'usage réel considérés (HYZEM en §12.4.2, et ARTEMIS dans ce paragraphe) ;
- ▷ étant donné que dans un logiciel forward, le couple et la vitesse à la roue varient à chaque seconde du fait de la régulation par rapport à la vitesse de consigne, il sera fort peu probable de voir apparaître des oscillations lorsque nous utiliserons les réseaux de neurones dans VEHLIB.

Pour conclure, disons que ce phénomène d'oscillation est l'apanage des logiciels backward sur des cycles de type « créneaux ».

[62] Et également la puissance des accessoires, entrée du réseau de neurones dont nous n'étudierons pas l'influence dans ce mémoire.

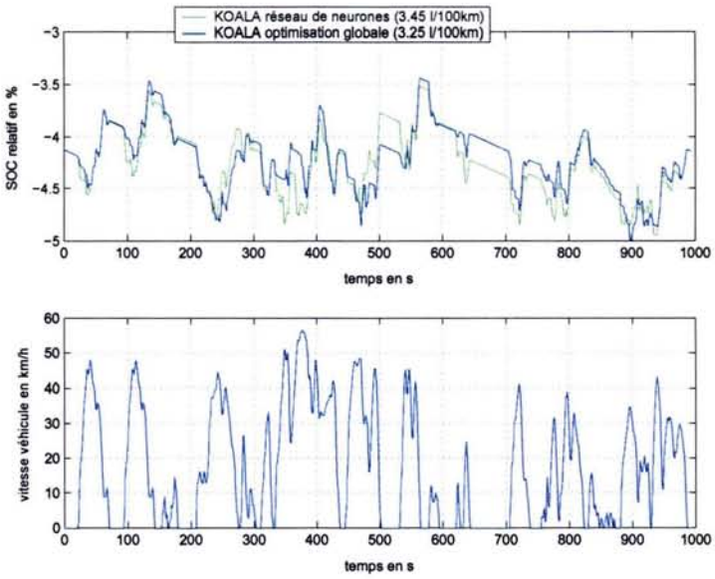


FIG. 12.11: *Apprentissage sur cycles HYZEM. Utilisation sur ARTEMIS urbain*

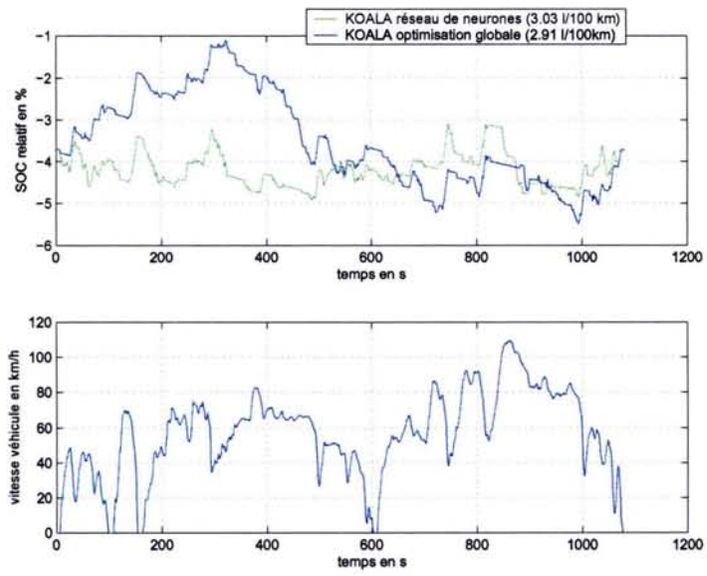


FIG. 12.12: *Apprentissage sur cycles HYZEM. Utilisation sur ARTEMIS routier*

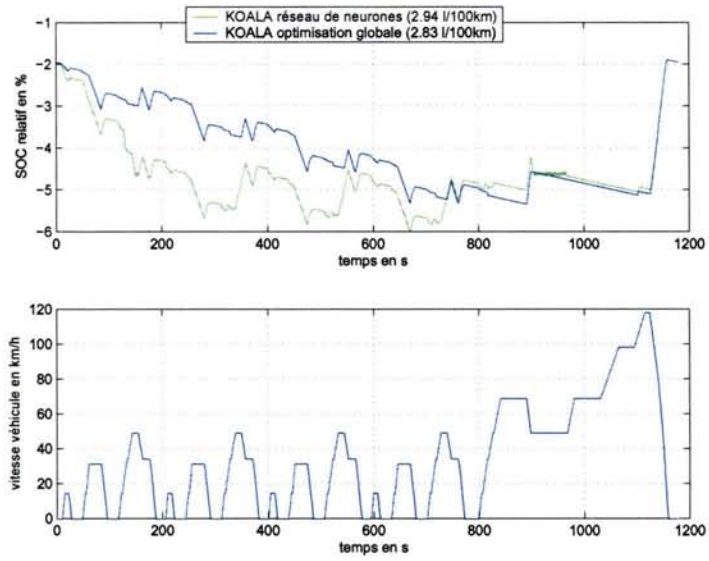


FIG. 12.13: *Apprentissage sur cycles HYZEM. Utilisation sur NEDC*

12.4.4 Comparaison pour diverses puissances de moteur électrique

Afin de comparer pour diverses puissances de moteur électrique les résultats de KOALA en ligne avec réseau de neurones, et KOALA hors ligne optimisation globale, les graphes de l'étude paramétrique présentés en chapitre 10 p.103 sont repris en ajoutant une courbe correspondant à la commande par réseaux de neurones (figures 12.14, 12.15, 12.16).

Les résultats en ligne sont relativement proches de l'optimum fourni par KOALA. De plus, on observe une homogénéité des écarts de consommation suivant la puissance du moteur électrique, sur l'ensemble des cycles considérés.

12.5 Application forward en ligne dans VEHLIB

12.5.1 Différences de modélisation avec l'application backward en ligne dans KOALA

À la suite de l'application backward en ligne des réseaux de neurones dans le modèle de KOALA, ceux-ci ont été introduits dans le calculateur de commande du véhicule dans VEHLIB (forward en ligne) (figure 12.17), sous forme de S-fonction.

Il est important d'insister sur le fait que la modélisation du véhicule est plus fine dans VEHLIB. Citons comme principales différences :

- ▷ comme déjà dit, VEHLIB est forward, et KOALA backward, ce qui est fondamentalement différent, de par la problématique du suivi de cycle par régulation, qui n'existe pas en backward ;
- ▷ la modélisation des changements de rapports, qui tient compte des pertes de motricité au niveau de la roue ;

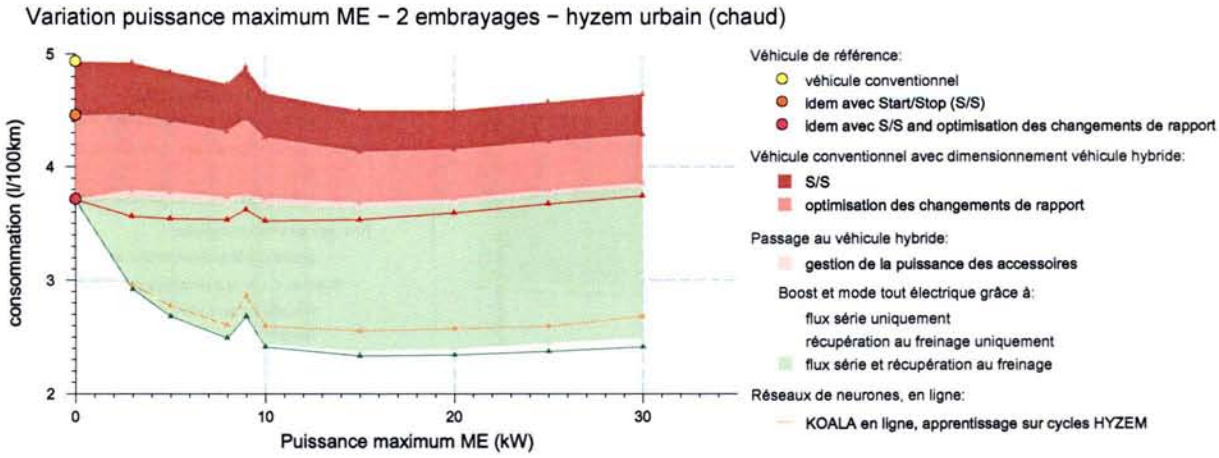


FIG. 12.14: *Variation de la consommation en fonction de la puissance du moteur électrique sur cycle HYZEM urbain*

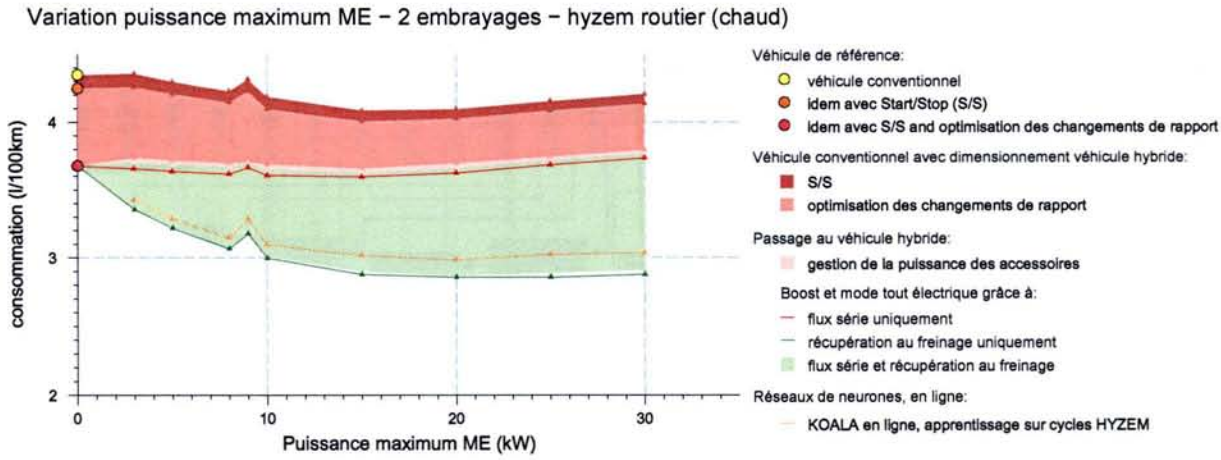


FIG. 12.15: *Variation de la consommation en fonction de la puissance du moteur électrique sur cycle HYZEM routier*

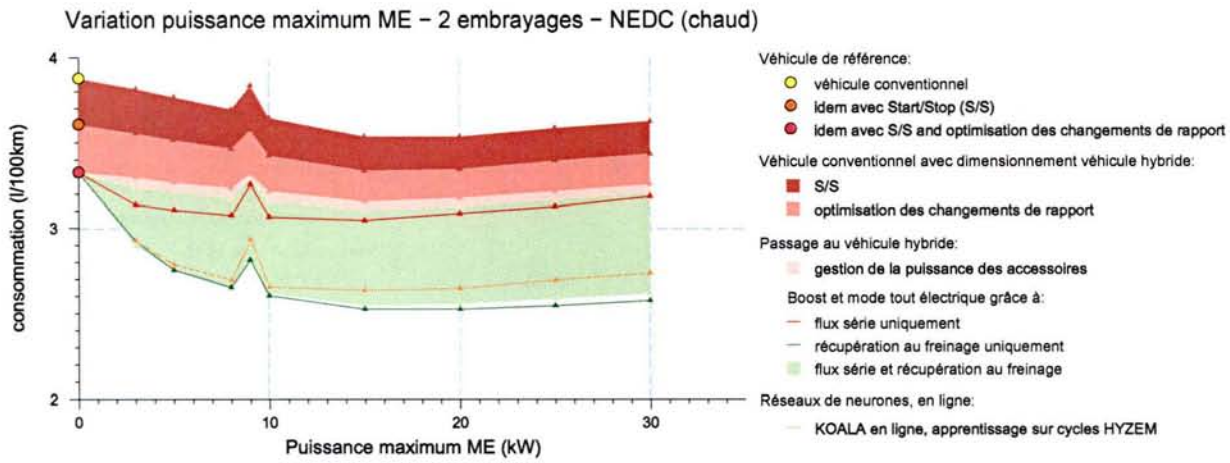


FIG. 12.16: *Variation de la consommation en fonction de la puissance du moteur électrique sur cycle NEDC*

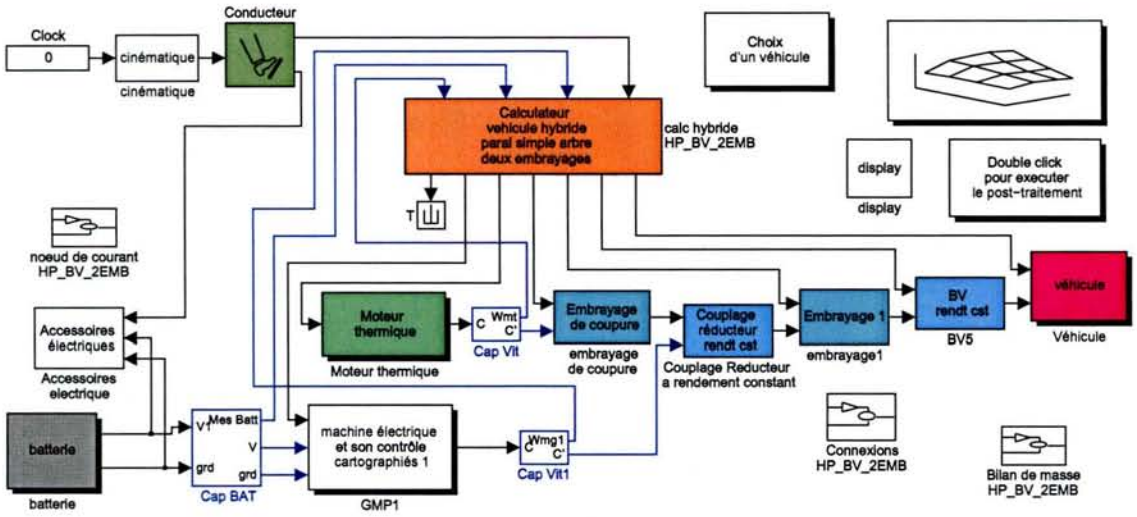


FIG. 12.17: *Vue générale du véhicule hybride parallèle deux embrayages dans VEHLIB*

▷ le coût du démarrage du moteur thermique ;
▷ la modélisation des pertes mécaniques à couple nul au niveau du moteur électrique.

Afin de quantifier l'influence des différences de modélisation sur l'état de charge et sur la consommation, les commandes optimales de KOALA sur le cycle NEDC ont été appliquées sur les machines thermique et électrique dans le modèle de VEHLIB. Sur les figures 12.18 et 12.19 sont détaillées les causes des différences de consommation et d'état de charge correspondantes :

▷ 1,37 Ah soit 3,42 % de profondeur de décharge en plus dans le modèle de VEHLIB par rapport au modèle de KOALA ;
▷ 0,18 l/100km soit 6 % de consommation en plus pour VEHLIB.

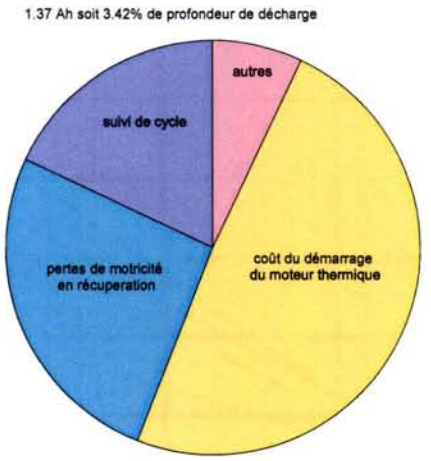


FIG. 12.18: *Répartition des causes de la décharge de la batterie dans le modèle de VEHLIB commandé avec les sorties de KOALA*

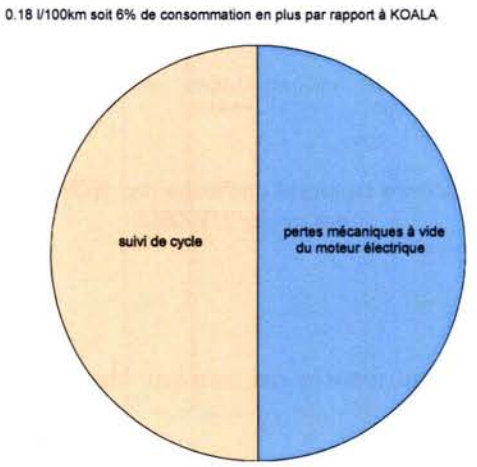


FIG. 12.19: *Répartition des causes de la hausse de consommation dans le modèle de VEHLIB commandé avec les sorties de KOALA*

12.5.2 Introduction de lois de confort

12.5.2.1 Choix des rapports de boîte avec hystérésis

Comme évoqué en §12.4, les rapports de boîte dans l'application KOALA backward en ligne sont optimisés instantanément.

Dans VEHLIB, nous avons utilisé une démarche différente en choisissant le rapport courant à partir d'une cartographie fournissant le rapport à adopter en fonction du régime et du couple à la roue. Cette cartographie (figure 12.20) est issue des résultats d'optimisation globale de KOALA sur cycles HYZEM, concernant les rapports de boîte optimaux. Un hystérésis sur le couple à la roue est réglé afin de ne pas osciller entre deux rapports de boîte.

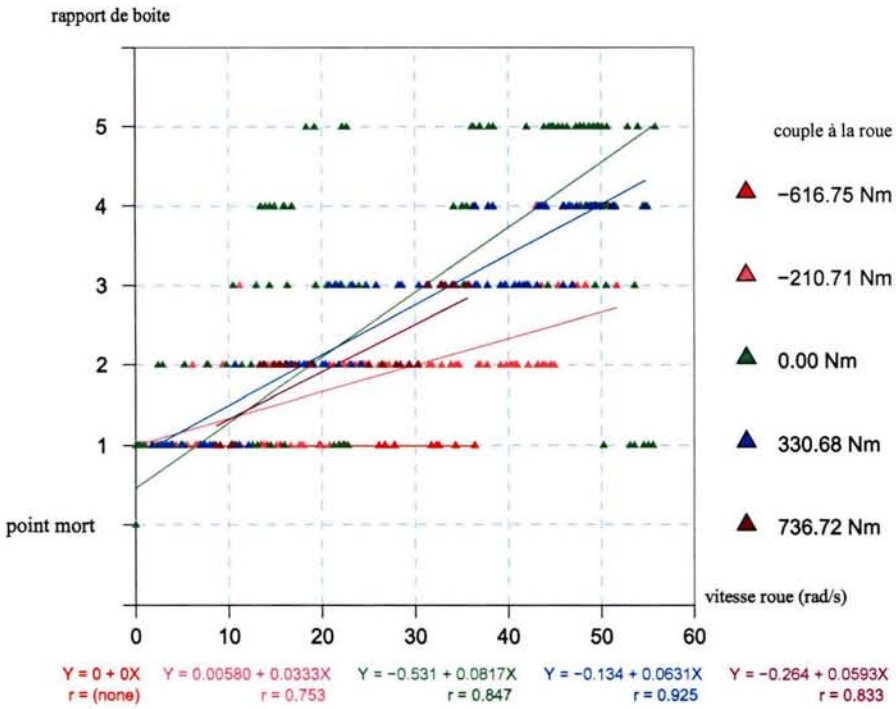


FIG. 12.20: *Allure des rapports optimisés par KOALA sur l'ensemble des cycles HYZEM*

12.5.2.2 Temps de marche minimum du moteur thermique

Nous avons fixé un temps de marche minimum du moteur thermique de 5 s. Notons que lorsque la vitesse du véhicule est régulée par rapport à une consigne donnée (comme dans VEHLIB, mais pas comme sur un véhicule réel, voir §5.1 p.57), cela peut entraîner une oscillation de la vitesse du véhicule autour de la consigne.

12.6 Le réseau de neurones en tant que conseiller concernant le flux série et le boost, dans le but de contrôler l'état de charge de la batterie

Comme cela a été dit en §11.2.2.4 p.121, le principal problème lors de l'élaboration d'une stratégie est de savoir quand et comment[63] réaliser du flux série ou du boost, dans l'optique d'obtenir une faible consommation de carburant et de contrôler l'état de charge de la batterie.

Nous avons confié cette tâche au réseau de neurones, ce qui donne de bons résultats lorsqu'on reste dans le cadre du modèle utilisé dans KOALA (§12.4).

Cependant, de par les différences de modélisation entre KOALA et VEHLIB[64], la pertinence de la base d'apprentissage du réseau de neurones montrée dans le modèle de KOALA, n'a plus forcément cours dans le modèle de VEHLIB. C'est pourquoi la puissance de moteur électrique qu'il fournit ne peut être vue que telle une indication, dont la réalisation sera décidée ou pas, suivant :

- ▷ la pertinence de celle-ci, tenant par exemple compte de seuils de déclenchement, réglés empiriquement ;
- ▷ la prise en compte de lois de confort, celles-ci ayant un degré de précédence plus élevé.

Dans les phases où il ne peut y avoir ambiguïté sur la commande à appliquer, comme par exemple lors des phases de freinage (récupération maximum avec le moteur électrique), la commande par réseau de neurones est court-circuitée. Le réseau de neurones tient donc un rôle de conseiller vis-à-vis du flux série et du boost, dans le but de contrôler l'état de charge de la batterie. La consommation de carburant devra néanmoins être maintenue aussi basse que possible.

Avec le passage au modèle de VEHLIB et la prise en compte de lois de confort prend donc fin la démarche systématique jusqu'alors présentée.

12.7 Influence du jeu de cycles servant à l'apprentissage

Afin de visualiser l'influence du jeu de cycles servant à l'apprentissage, le tableau 12.1 compare les consommations obtenues dans KOALA et VEHLIB, pour diverses configurations, avec les notations suivantes :

- ▷ V ou K : VEHLIB ou KOALA ;
- ▷ RI ou RO : rapports imposés ou optimisés ;
- ▷ EL ou HL : hors ligne ou en ligne. VEHLIB est forcément en ligne, avec commande par réseau de neurones. KOALA hors ligne correspond à l'optimisation globale, tandis que KOALA en ligne correspond à la version avec réseau de neurones.

Les cases N correspondent à la non-possibilité de réaliser le cycle correspondant rapports imposés (i.e. ceux définis pour un conducteur moyen), du fait que ceux-ci ne sont pas disponibles, ni dans les normes, ni dans la littérature.

Les cases X correspondent au non-contrôle asymptotique de l'état de charge par la stratégie. Ici cela arrive sur cycle urbain lent 1, du fait de ses fortes accélérations à faible vitesse, réalisées

[63] i.e. qualitativement et quantitativement.

[64] Nous rappelons que ces différences de modélisation sont inéluctables, du fait qu'une optimisation globale ne peut avoir cours que dans le cadre d'une modélisation simplifiée du véhicule.

préférentiellement en tout électrique par le réseau de neurones. Dans ce cas, trois solutions s'offrent à nous :

- ▷ appliquer un fonctionnement d'urgence lorsqu'on atteint le mode dégradé (§11.3.1 p.121) ;
- ▷ ajouter un proportionnel au niveau de l'entrée état de charge du réseau de neurones, afin d'avoir plus de chances de le contrôler sur ce cycle (§11.3.2.3 p.129) ;
- ▷ étendre l'apprentissage sur des cycles de type urbain lent, afin d'appliquer des commandes utilisant moins le moteur électrique, à faibles vitesses véhicule. L'état de charge devrait alors être contrôlé.

On note par ailleurs que la signature des cycles correspondant à un usage congestionné (e.g. urbain lent) est un état de charge d'équilibre asymptotique à forte profondeur de décharge batterie, ainsi qu'une hausse de consommation importante par rapport à l'optimum calculé hors ligne. Ceci peut légitimer l'extension de l'apprentissage à ce genre de cycles. Ce travail est en cours de réalisation.

De manière générale, on peut noter de faibles écarts de consommation entre l'apprentissage sur HYZEM et l'apprentissage sur ARTEMIS.

12.8 Nombre de neurones et application sur banc dynamique

Les réseaux de neurones considérés dans les pages précédentes contenaient de un à quelques milliers d'unités. Lorsqu'on envisage l'application des réseaux de neurones en embarqué, le facteur mémoire/temps de calcul est à prendre en compte. C'est pourquoi il est nécessaire de réaliser une étude de sensibilité montrant l'influence du nombre de neurones sur la qualité des résultats. Celle-ci n'a pour l'instant pas été effectuée. Citons comme pistes de travail :

- ▷ utilisation de méthodes d'élagage (évoquées en §12.2.7.7 p.141). Dans le cas du réseau RBF-DDA, à notre connaissance peu de choses existent dans la littérature. On peut imaginer de supprimer les neurones de classe isolée, et examiner l'influence sur la somme des erreurs entre les sorties d'apprentissage et les sorties réelles en phase d'utilisation ;
- ▷ pour les couples à la roue négatifs, l'optimum instantané consiste bien entendu à récupérer au maximum avec le moteur électrique : le réseau de neurones n'est d'aucune utilité. Il est donc possible de ne réaliser l'apprentissage que dans le cadran positif du couple à la roue.

apprentissage sur →	cycles ARTEMIS								cycles HYZEM							
utilisation sur ↓	consommation VHTE à bilan batterie nul (RO-K-EL) (l/100 km)	SOC d'équilibre correspondant(%)	augmentation de consommation par rapport à l'optimum (RO-K-HL)(%)	gain par rapport au véhicule de référence (RO-K-HL)(%)	gain par rapport au véhicule de référence rapports imposés (RI-K-HL) (%)	consommation à bilan batterie nul du VHTE (RO-V-EL) (l/100km)	SOC d'équilibre correspondant(%)	gain par rapport au véhicule de référence (RI-V-EL) (%)	consommation VHTE à bilan batterie nul (RO-K-EL) (l/100 km)	SOC d'équilibre correspondant(%)	augmentation de consommation par rapport à l'optimum (RO-K-HL)(%)	gain par rapport au véhicule de référence (RO-K-HL)(%)	gain par rapport au véhicule de référence rapports imposés (RI-K-HL) (%)	consommation à bilan batterie nul du VHTE (RO-V-EL) (l/100km)	SOC d'équilibre correspondant(%)	gain par rapport au véhicule de référence (RI-V-EL) (%)
HYZEM urbain	2.81	-1.4	+3.2	-32	-43	3.49	-6.5	-31	2.85	-3.0	+4.8	-31	-42	3.56	-3.8	-30
HYZEM routier	3.24	-0.5	+1.4	-14	-26	3.73	-3.2	-15	3.27	-3.5	+2.4	-13	-25	3.75	-4.4	-15
HYZEM autoroutier	4.45	-1.5	+0.8	-4	-6	4.73	-3.9	0	4.45	-3.3	+0.9	-4	-6	4.74	-3.9	0
ARTEMIS urbain	3.40	-2.7	+3.7	-32	-41	4.39	-16.9	-25	3.43	-3.5	+4.5	-32	-40	4.36	-4.7	-26
ARTEMIS routier	2.98	-1.6	+2.2	-11	-26	3.30	-4.1	-18	3.01	-3.4	+3.2	-10	-25	3.33	-4.2	-17
ARTEMIS autoroutier	4.70	-0.8	+0.8	-3	-4	4.94	-3.0	0	4.71	-2.5	+0.9	-3	-4	4.95	-3.8	0
NEDC	2.86	-3.1	+0.6	-20	-26	3.36	-5.2	-14	2.91	-2.5	+2.1	-19	-25	3.34	-2.6	-15
Urbain lent 1	5.98	-35.7	+10.0	-55	N	X	X	N	6.02	-25.7	+10.2	-55	N	X	X	N
Urbain lent 2	3.79	-17.3	+3.9	-50	N	6.26	-26.5	N	4.08	-15.6	+11.2	-46	N	5.97	-24.4	N
Urbain fluide 1	3.48	-5.4	+1.8	-46	N	5.92	-18.0	N	3.56	-4.6	+4.5	-45	N	5.05	-15.3	N
Urbain fluide 2	2.91	-4.7	+4.9	-30	N	4.89	-15.4	N	2.93	-4.4	+5.7	-30	N	3.80	-14.6	N

TAB. 12.1: *Résumé des gains ou pertes de consommation obtenus avec la commande par réseau de neurones, dans KOALA et VEHLIB, pour le véhicule hybride deux embrayages équipé du moteur thermique de la Clio 1.5l dCi, et du moteur électrique Valeo Mars*

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHEQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11
54601 VILLERS-LES-NANCY CEDEX

Chapitre 13

Confrontation à l'expérience

13.1 Installations disponibles à l'INRETS Bron

13.1.1 Banc à rouleau

Au sein du LTE, l'équipe EPA (évaluation de la pollution de l'air) dispose d'un banc à rouleau permettant de simuler des conditions de roulage réelles, et de mesurer la consommation et les émission de polluants.

La génératrice du banc à rouleau de l'INRETS a pour puissance (resp. couple) nominale **93 kW** (resp. **2100 Nm**) et puissance (resp.couple) maximale **132 kW** (resp. **3000 Nm**). La puissance maximum est atteinte pour une vitesse de rouleau équivalente à **100 km/h** au compteur du véhicule testé.

Une description sommaire de l'usage du banc à rouleau est présentée en annexe E p.179.

FIG. 13.1: *Véhicule Volkswagen/Valeo « Stop and Go » fixé sur le banc à rouleau du LTE pour mesures de consommations*

13.1.2 Banc moteur dynamique

Le banc moteur dynamique, dont on peut trouver une vue générale en configuration véhicule conventionnel sur la figure 13.2, et en configuration hybride deux embrayages sur la figure 13.3, a pour but de :

- ▷ simuler en temps réel le fonctionnement d'un véhicule conventionnel ou hybride évoluant sur un cycle normalisé ou d'usage réel avec un ou plusieurs des éléments suivants présents sur le banc d'essai :
  - ◇ moteur thermique ;
  - ◇ moteur électrique ;
  - ◇ batterie ;
  - ◇ embrayage côté moteur thermique commandé.

  Les autres composants sont simulés.
- ▷ réaliser des bilans comparatifs performances/consommation/émissions entre motorisations classiques, et hybrides optimisées.

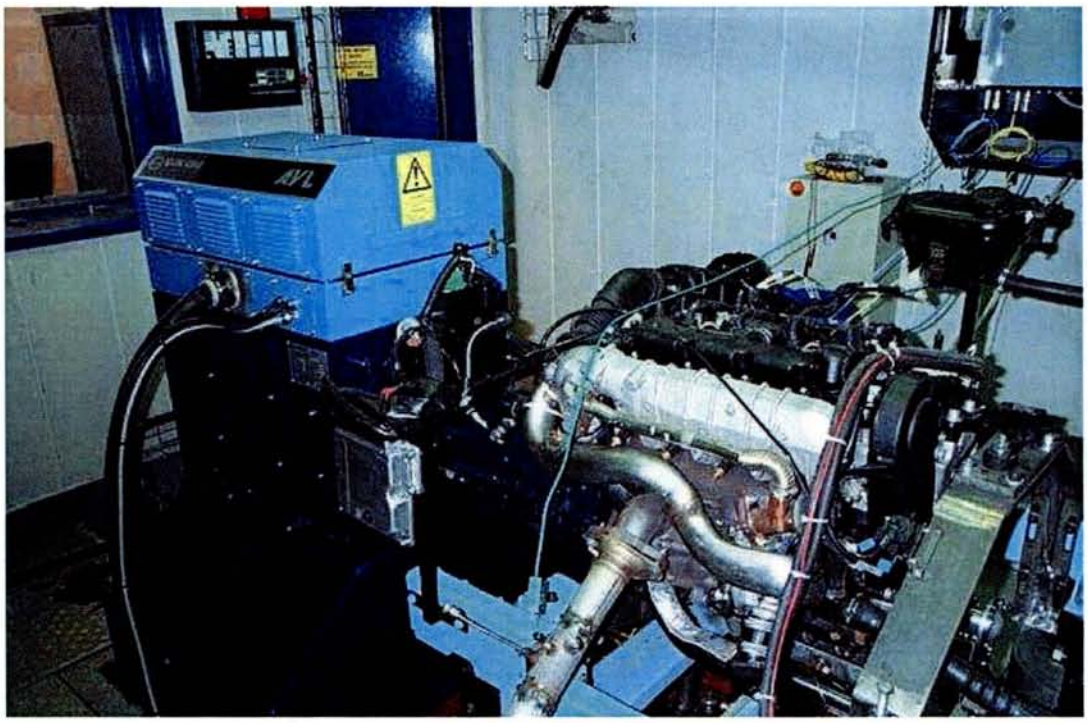


FIG. 13.2: *Banc moteur dynamique du LTE. Configuration véhicule conventionnel 306 HDI (moteur DW10TD).*

Le principe de fonctionnement du banc dynamique est décrit sur la figure 13.4. Ce schéma correspond au fonctionnement $N - \alpha$, c'est-à-dire qu'une consigne d'injection α est donnée au moteur thermique, tandis que la génératrice commande son couple de manière à réguler le régime de rotation à la vitesse N. Deux autres éléments du banc sont commandés :

- ▷ le moteur électrique Valeo Mars est commandé en couple ;
- ▷ l'embrayage robotisé Valeo est commandé en position.

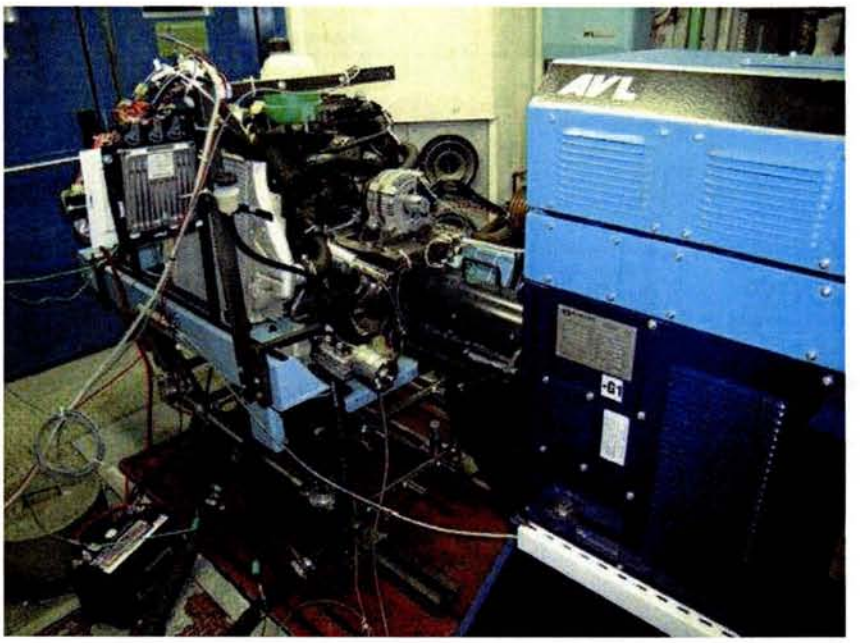


FIG. 13.3: *Banc moteur dynamique du LTE. Configuration véhicule hybride deux embrayages avec moteur thermique Renault 1.5 l dCi, moteur électrique Valeo Mars, et embrayage commandé Valeo*

La tension batterie est mesurée et le courant batterie saturé afin de ne pas dépasser les tensions maximum et minimum préconisées par le constructeur. Le courant mesuré est intégré afin d'obtenir une estimation de l'état de charge batterie.

13.1.3 Système d'analyse des polluants

Les mesures de consommation sur le banc moteur dynamique sont pour l'instant fournies par un système de balance, de marque AVL. Afin de pouvoir mesurer les émissions de CO_2 et de polluants réglementés de manière plus précise, un système d'analyse des polluants a été installé récemment à l'INRETS (figure 13.5). À terme, il devrait être commun au banc à rouleau et au banc moteur dynamique, ce qui devrait faciliter les comparaisons entre les mesures effectuées sur chacun des deux systèmes.

13.2 Résultats expérimentaux

13.2.1 Utilisation des réseaux de neurones dans l'applicatif temps réel VEHIL

Au sein de l'équipe véhicules hybrides du LTE, Bruno Jeanneret et Rochdi Trigui ont développé un dérivé temps réel de la bibliothèque VEHLIB, l'applicatif VEHIL [JTM+04]. Comme précisé sur la figure 13.4, celui-ci permet de commander le banc dynamique moteur, via deux cartes DSPACE et l'armoire EMCON 300 du système AVL. Le modèle de véhicule hybride parallèle à

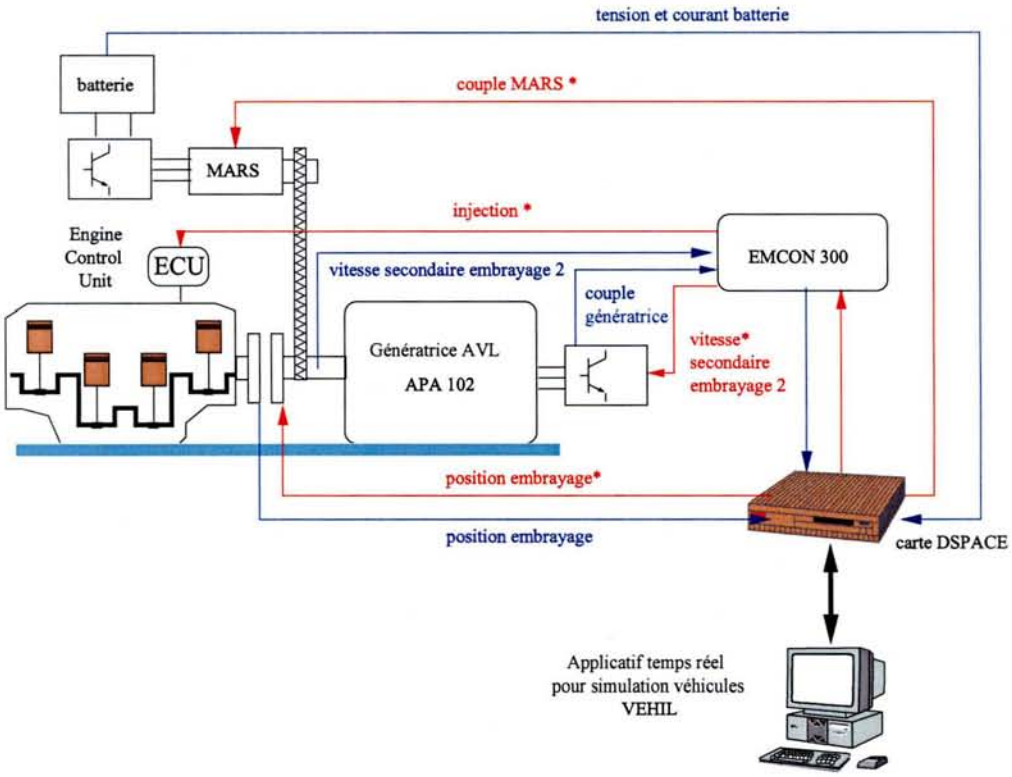


FIG. 13.4: *Synoptique du banc moteur dynamique du LTE*

FIG. 13.5: *Système d'analyse des polluants du LTE*

deux embrayages présenté sur la figure 12.17 est amputé des éléments déjà présents sur le banc : le moteur thermique de la Clio 1.5l dCi, le moteur électrique Valeo Mars et sa batterie, ainsi que l'embrayage robotisé Valeo côté moteur thermique.

Le schéma de commande Simulink correspondant, avec conseil par réseau de neurones, est compilé puis transféré dans les cartes DSPACE.

Les premiers résultats font état d'une consommation de 3,62 l/100 km sur cycle NEDC, à comparer aux 4,0 l/100 km annoncés pour le véhicule de référence Clio 1.5l dCi (gain de 7%).

Néanmoins, le travail d'élaboration de lois de commande est en cours, et en constante amélioration. Un certain nombre de facteurs limitants sont apparus au banc :

- ▷ la résistance interne de la batterie Exide Orbital, de valeur plus importante que ce qu'indiquent les spécifications constructeur. De ce fait, la récupération au freinage est limitée : le couple du moteur électrique est régulé de telle manière que la tension de la batterie ne monte pas au-dessus d'une limite correspondant au début de la phase de dégagement gazeux (« derating ») ;
- ▷ le démarrage du moteur thermique est assez long, du fait que pour l'instant celui-ci est réalisé de manière inertielle : décollage en tout électrique du véhicule, fermeture rapide de l'embrayage côté moteur thermique lorsque la vitesse à la roue est telle qu'en premier rapport la vitesse du moteur thermique soit supérieure à son régime de ralenti. Ceci correspond à une décharge supplémentaire par rapport aux conseils fournis par le réseau de neurones.

Le premier facteur limitant peut être résolu via l'introduction d'un système tel que le 12+X présenté par VALEO [CSP04] : une supercapacité permet de faire face aux pics de puissance que la batterie est incapable de supporter. Il pourrait aussi être résolu en faisant l'acquisition de packs batterie plus adaptés au travail en puissance.

Le deuxième facteur limitant est dû à l'incapacité du moteur thermique de fournir assez de couple en dessous de son régime de ralenti. Un test par valise de diagnostic n'a rien révélé. Ceci est en cours d'investigation.

Sur la figure 13.6 sont représentées d'une part les vitesses véhicule demandée et réalisée sur cycle NEDC, et d'autre part, la consigne d'injection du moteur thermique et le courant batterie. Ces grandeurs ont été mesurées sur le banc, pour un ΔSOC proche de zéro (0.008% de décharge batterie). On peut voir un bon nombre de phases de fonctionnement en flux série, conseillées par le réseau de neurones. Cela montre que la recharge due à la récupération au freinage n'est pas suffisante pour assurer le maintien de l'état de charge de la batterie sur le cycle NEDC. Ceci est principalement dû aux deux raisons invoquées précédemment.

13.2.2 Optimisation des rapports de boîte sur un véhicule thermique classique

Les résultats de l'optimisation globale fournis par KOALA ont également été testés sur banc à rouleau.

Le but est d'utiliser sur le banc à rouleau du LTE les rapports de boîte optimaux fournis par KOALA dans le cas du véhicule thermique conventionnel. Cependant, ceux-ci peuvent être relativement perturbés. En effet, suivant le couple et la vitesse à la roue, l'allure de la cartographie moteur thermique, le rapport peut changer pratiquement à chaque instant de calcul. On rappelle que le désagrément dû aux changements de rapports n'est pas pris en compte dans KOALA.

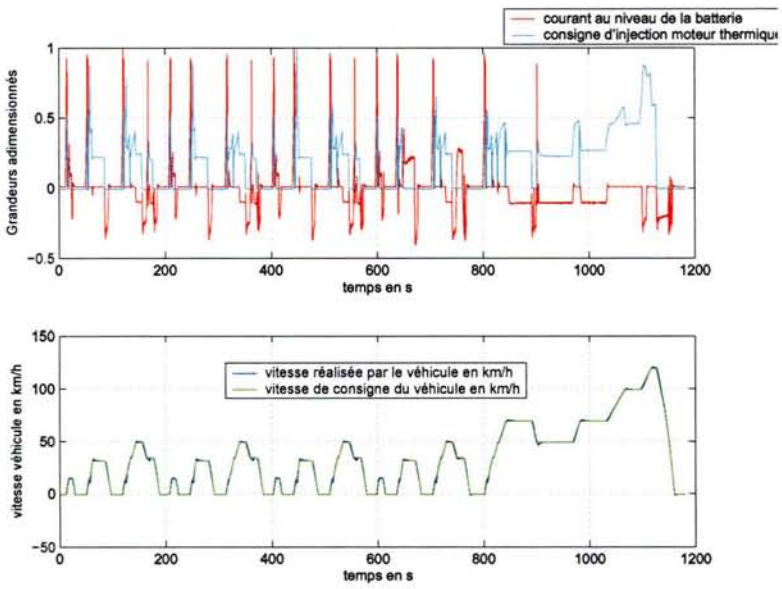


FIG. 13.6: *Vitesses véhicule demandées et réalisées ; consigne d'injection et courant batterie correspondants (cycle NEDC)*

En outre, ces rapports engendrent de faibles régimes moteur qui pourraient amener un comportement inconfortable. Ce point sera examiné sur le banc à rouleau de l'INRETS-LTE.

Afin de fournir des lois de changement de rapport procurant plus de confort, nous avons procédé à un lissage des rapports de boîte optimisés par KOALA. Notons qu'on aurait pu choisir une loi empirique comme celle utilisée dans le modèle VEHLIB comprenant le réseau de neurones (figure 12.20 p.152).

13.2.2.1 Procédure de lissage des rapports

Sur la figure 13.7 sont représentés les rapports optimisés fournis par KOALA lors de l'optimisation globale, pour un véhicule hybride un embrayage.

Un algorithme de lissage des rapports fournis par KOALA a été mis au point afin d'éviter des changements trop fréquents. Les rapports lissés sont tels que :

- ▷ chaque rapport reste engagé au moins trois secondes ;
- ▷ dans la mesure du possible, on évite de sauter des rapports lors des changements ;
- ▷ on essaie de respecter la plage de régimes moteur correspondant aux rapports de boîte optimisés.

Sur la figure 13.8 sont représentés ces rapports lissés, pour le même véhicule que celui utilisé en figure 13.7. Dans le tableau 13.1 sont présentés les nombres de changement de rapport sur les différents cycles HYZEM. La référence correspond aux rapports imposés par un conducteur moyen [ALH+03] ;

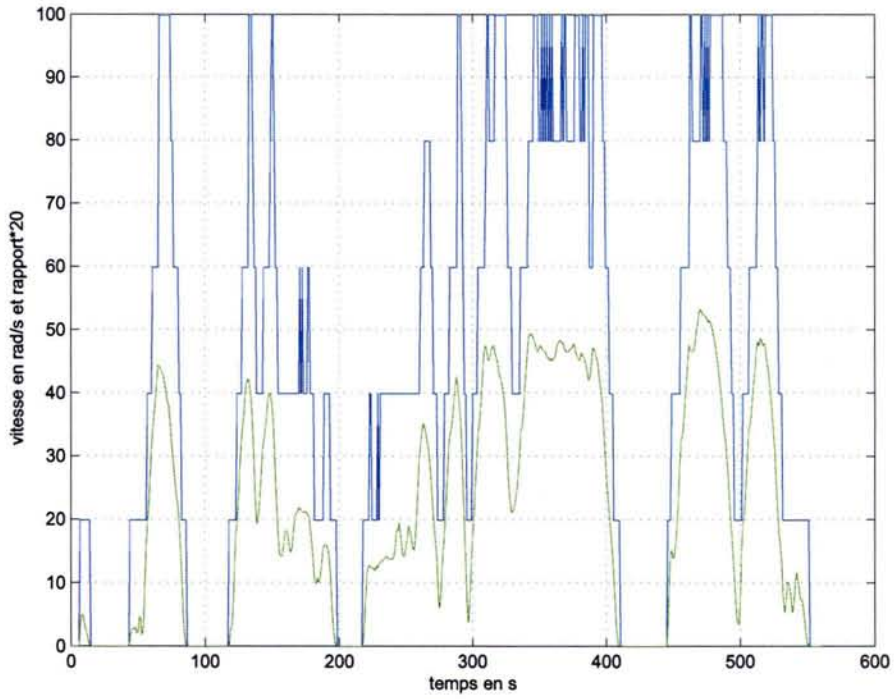


FIG. 13.7: *Rapports de boîte non lissés et vitesse à la roue pour un véhicule thermique classique (cycle HYZEM urbain)*

nombre de changements de rapports	référence	KOALA optimisés	KOALA lissés
HYZEM urbain	35	119	67
HYZEM routier	53	169	78
HYZEM autoroutier	42	103	62

TAB. 13.1: *Nombre de changements de rapports sur les cycles HYZEM*

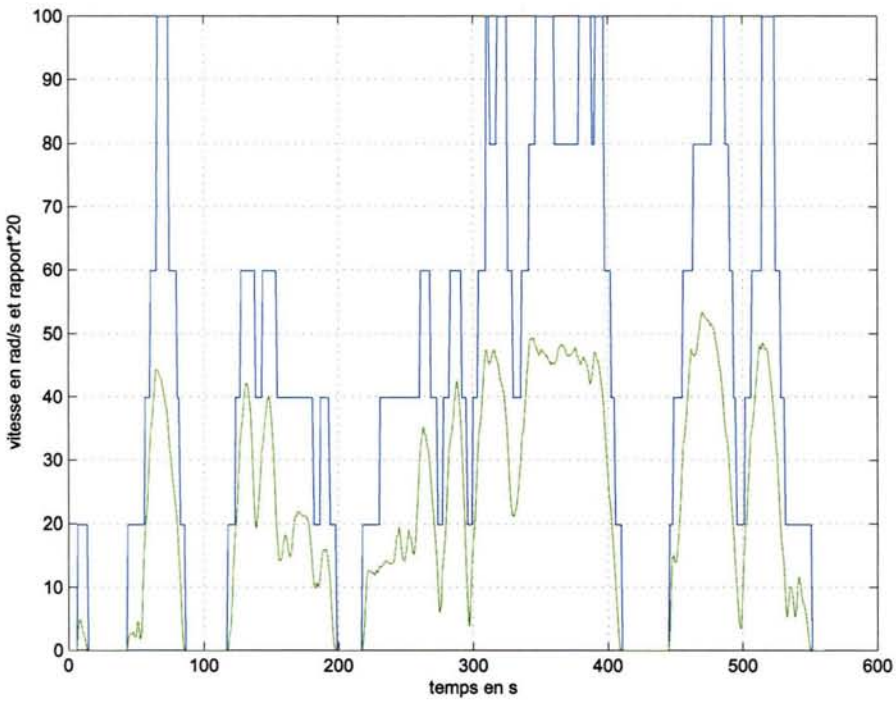


FIG. 13.8: *Rapports de boîte lissés et vitesse à la roue pour un véhicule thermique classique (cycle HYZEM urbain)*

13.2.2.2 Impact sur la consommation de carburant

L'algorithme de lissage a été utilisé pour générer une suite de rapports de boîte optimisés-lissés, pour un véhicule thermique conventionnel Peugeot 306 HDI. Ce dernier est expérimenté au banc à rouleau sur cycles HYZEM, les rapports utilisés par le conducteur étant les rapports optimisés-lissés en question.

Le tableau 13.2 indique les gains en consommation en comparaison au même cycle avec les rapports de boîte utilisés par un conducteur moyen. On remarque que ces gains sont quasiment identiques entre le banc et KOALA.

En revanche, les valeurs de consommations absolues sont plus élevées sur le banc. Cet écart peut être en particulier expliqué par les transitoires du moteur thermique, qui ne sont pas pris en compte dans KOALA.

Des résultats concernant les émissions de polluants réglementés sont présentés en annexe E p.179.

cycles	KOALA optimisé	KOALA optimisé lissé	KOALA cond. moyen	Banc lissé	Banc cond. moyen
urbain	5.46 (-17%)	5.61 (-15%)	6.58	5.79 (-18%)	7.04
routier	4.51 (-15%)	4.58 (-14%)	5.31	4.94 (-14%)	5.76
autoroutier	5.11 (-3%)	5.12 (-3%)	5.28	5.76 (-3%)	5.93

TAB. 13.2: *Consommations (l/100 km) données par KOALA et mesurées sur le banc à rouleau*

13.2.3 Conclusion

L'optimisation des changements de rapports de boîte entraîne des gains importants en consommation et émissions de polluants. Cependant, le nombre de changements de rapports est important. En pratique, l'agrément de conduite observé pendant les essais sur banc à rouleau est resté convenable, même s'il exige une utilisation de la pédale d'accélérateur avec une forte amplitude. Il faudrait implémenter ces changements de rapports sur un véhicule à boîte de vitesse robotisée, et observer l'acceptation par le conducteur des reprises disponibles.

Un avantage de l'hybride est de pouvoir profiter de couples élevés sur le moteur électrique à faible régime, afin d'assurer des reprises satisfaisantes. Un exemple est présenté sur la figure 13.9 : un véhicule hybride en 5ème rapport de boîte bénéficie des mêmes reprises qu'un véhicule thermique conventionnel en 3ème. La comparaison est effectuée entre des véhicules disposant de performances dynamiques équivalentes.

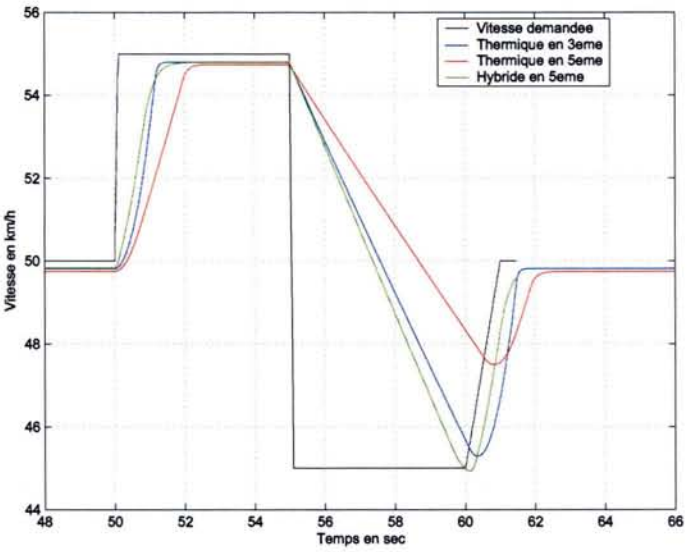


FIG. 13.9: *Vitesse véhicule demandée et réalisée pour un échelon de vitesse, dans trois configurations différentes*

Conclusion générale

Du fait de normes toujours plus contraignantes, les constructeurs automobiles et les équipementiers ont dû proposer des améliorations, qui ont permis de réduire de manière sensible les émissions unitaires de polluants réglementés (e.g. amélioration de la combustion, systèmes de post-traitement). Néanmoins, les inquiétudes du public quant à un éventuel accroissement de l'effet de serre incitent à proposer de nouvelles solutions moins consommatrices de carburants fossiles. Dans ce contexte, le véhicule hybride constitue une solution intéressante.

Un certain nombre de travaux fournissant des résultats d'optimisation globale de la gestion d'énergie d'un véhicule hybride ont déjà été menés [Del02, Dub02, Ven01]. Néanmoins, l'aspect dimensionnement du véhicule, c'est-à-dire l'évolution des consommations suivant certains paramètres constitutifs de ses composants, avait été peu traité. Afin de résoudre ce problème, nous avons développé un outil d'optimisation globale, KOALA, qui permet de déterminer hors ligne, de manière systématique, la meilleure consommation atteignable en ligne, pour un véhicule hybride donné. Ses caractéristiques ont permis le codage de multiples architectures de motorisation. KOALA a trouvé son plein potentiel à travers l'étude paramétrique des architectures hybrides PARAVH, menée en collaboration avec l'ADEME, Valeo, et Exide [DRST+04] ; de celle-ci a résulté une meilleure vision des paramètres influant sur le gain potentiel en consommation du véhicule hybride. En particulier, le gain de l'hybridation a été scindé en plusieurs parts correspondant aux diverses fonctionnalités du véhicule hybride (start/stop, gestion énergétique de la puissance des accessoires, etc.), ceci dans le cadre d'une optimisation globale.

Parmi les résultats obtenus via l'outil d'optimisation globale KOALA, nous pouvons citer les suivants :

- ▷ selon le véhicule hybride, le cycle d'usage, et les contraintes de performances dynamiques considérés, un optimum de dimensionnement par rapport au critère consommation de carburant apparaît (§10.1.1 p.105) ;
- ▷ pour un fonctionnement en charge sustaining, les stratégies optimales correspondent à une décharge relativement peu profonde de la batterie, cela pour l'ensemble des cycles de conduite auxquels nous nous sommes intéressés (§9.5 p.93) ;
- ▷ selon les dimensionnements et les composants considérés, et pour de faibles puissances d'accessoires électriques, le flux série peut être nécessaire au maintien de l'état de charge de la batterie, mais ne semble pas intéressant en ce qui concerne le gain en consommation du véhicule. Néanmoins lorsque la puissance des accessoires augmente, le flux série, et en particulier les instants auxquels il est réalisé, sont cruciaux vis-à-vis de cette même consommation (§10.1.3 p.109).

Un deuxième aspect de notre travail est la génération systématique de lois de gestion d'énergie en ligne à partir des résultats de l'optimisation globale fournis par KOALA. Celle-ci est effectuée à travers une commande par réseau de neurones dont l'apprentissage, réalisé sur un jeu de cycles

représentatifs de l'ensemble des conditions d'usage réel (urbain, routier, autoroutier), est justifié préalablement par une étude inédite concernant le maintien de l'état de charge de la batterie dans sa zone préférentielle.

Ces lois en ligne avec conseil par réseau de neurones sont actuellement utilisées sur le banc moteur dynamique du LTE.

Plusieurs perspectives peuvent être envisagées suite à cette étude. Certaines de celles-ci font l'objet de travaux en cours. Citons à titre d'exemple :

- ▷ l'étude de sensibilité du nombre de neurones sur la qualité des résultats de la loi de gestion en ligne ;
- ▷ dans le cas d'un trajet connu (transports en commun), amélioration des résultats de la loi de gestion en ligne par reconnaissance du trajet en cours. Pour accomplir cet objectif, l'utilisation de réseaux de neurones semble constituer une piste intéressante ;
- ▷ poursuite et amélioration des lois prenant en compte l'agrément de conduite, pour application sur banc moteur dynamique. En particulier, on peut imaginer d'interdire l'arrêt du moteur thermique pour des vitesses véhicule supérieures à 50 km/h, comme c'est le cas sur la Toyota Prius [JH99] ;
- ▷ codage dans KOALA d'autres types de stockage (e.g. supercapacités), ou d'architectures de motorisation, comme par exemple l'hybride pile à combustible/batterie.

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11
54601 VILLERS-LES-NANCY CAMPUS

Annexe A

Démarche globale employée dans le cadre de la thèse et de l'étude PARAVH

Sur la figure A.1 est représentée la démarche globale utilisée dans le cadre de la thèse et l'étude PARAVH [DRST+04] :

- ▷ premièrement le dimensionnement du véhicule hybride est effectué, afin de satisfaire un cahier des charges de performances dynamiques. Celui-ci est donné par les performances d'un véhicule thermique conventionnel existant ;
- ▷ deuxièmement, KOALA permet de déterminer les gains potentiels en consommation de carburant, pour le véhicule dimensionné, et sur un cycle de vitesse donné ;
- ▷ troisièmement, des lois en ligne sont élaborées, afin d'être utilisées sur le banc dynamique du LTE. Ceci est réalisé via l'apprentissage des lois optimales de KOALA, en ce qui concerne : la vitesse et le couple à la roue, la puissance des accessoires, et l'état de charge de la batterie. La sortie du réseau de neurones est la puissance du moteur électrique. Le réseau de neurones est ensuite utilisé en simulation avec VEHLIB, puis en temps réel sur le banc dynamique via VEHIL.

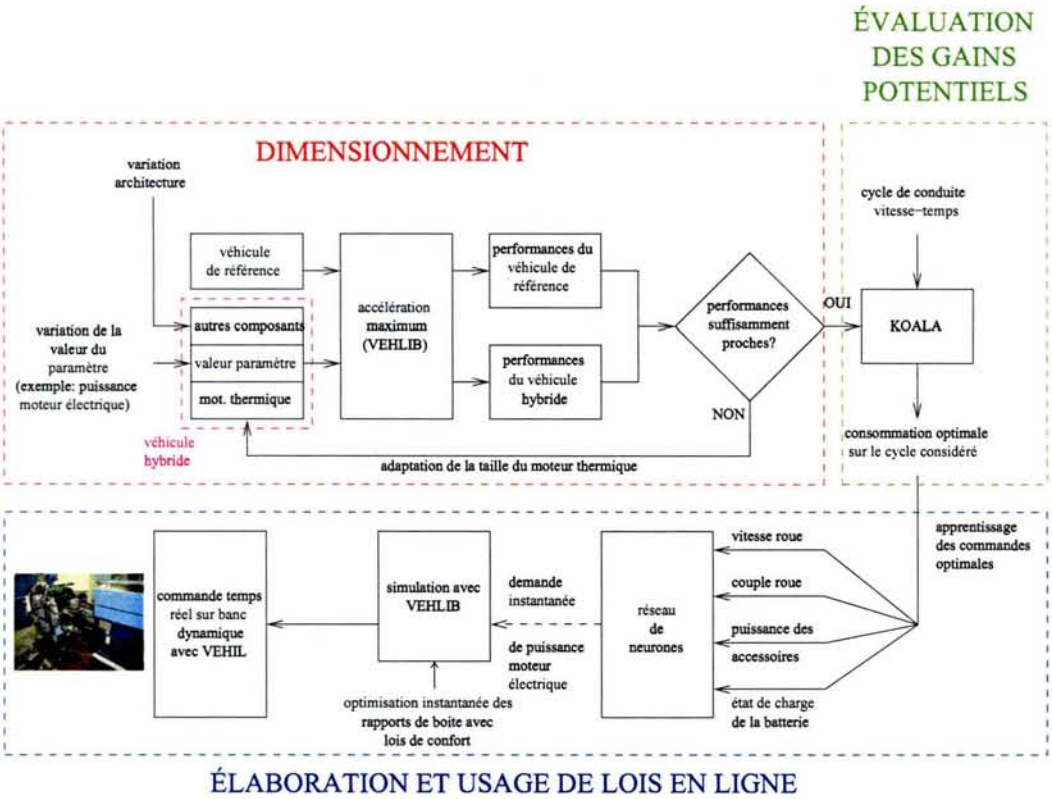


FIG. A.1: *Schéma de principe simplifié de la démarche globale employée au LTE*

Annexe B

Glossaire

Dans ce glossaire sont définis les principaux termes ayant usage dans le domaine du véhicule électrique hybride. Ces définitions découlent de discussions menées au LTE, en particulier avec R. Trigui, et M. Desbois-Renaudin qui en est le principal auteur. D'autres terminologies existent, telle que celle présentée dans [Ber98]. Celle qui est présentée ici est adaptée au véhicule électrique hybride comprenant une seule source d'énergie irréversible, l'autre étant réversible. La figure B.1 permet de situer chaque élément du lexique au niveau du système constitué par le véhicule.

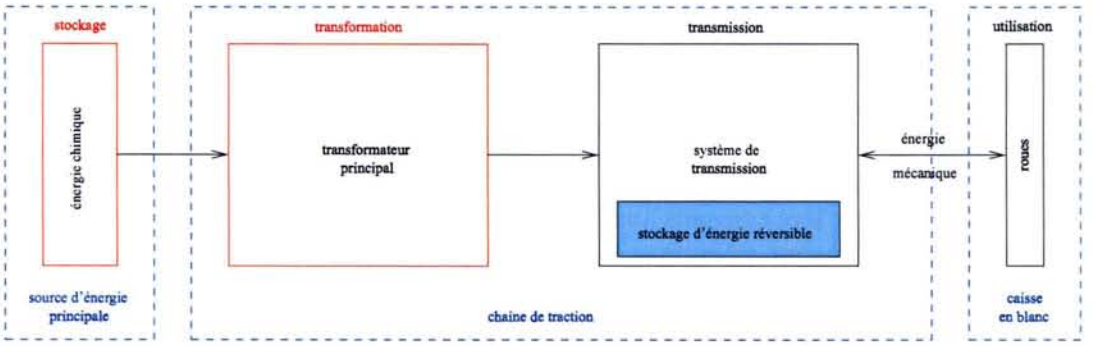


FIG. B.1: *Synoptique du véhicule hybride*

Architecture Agencement des différents éléments de la chaîne de traction : Méthode de couplage des différents moteurs (addition de couple, de vitesse ?), Type de transmission et variation de vitesse (électrique, continue, discrète ?).
Une architecture peut avoir plusieurs dimensionnements différents (cf dimensionnement).

Boost Dans le présent rapport, lorsque, dans un véhicule hybride thermique-électrique, la machine électrique assiste le moteur thermique dans une phase de traction , on parle de mode « boost » : les deux moteurs fournissent de la puissance.

Bilan stockeur nul (fonctionnement à) Fonctionnement dans lequel l'énergie contenue dans le stockage réversible est flottante autour d'une valeur moyenne ("charge sustaining") pendant l'usage. Ainsi, le stockeur d'énergie peut revenir à ses conditions initiales sans recharge extérieure. Ce type de fonctionnement est indispensable pour pouvoir comparer une solution hybride à une solution classique.

Caisse "en blanc" : Structure, châssis du véhicule à vide : sans sa chaîne de traction. Les caractéristiques de la caisse "en blanc" sont :

- ▷ sa masse et sa charge embarquée (nombre de personnes + bagages) ;
- ▷ la puissance nécessaire au fonctionnement des accessoires (Autoradio, climatisation, feux de route, etc.) ;
- ▷ sa traînée aérodynamique (c_x, surface frontale) et sa résistance au roulement, généralement modélisées par une équation caractéristique fonction de la vitesse.

Chaîne de traction Ensemble des composants qui assurent la transmission de l'énergie, depuis la source d'énergie principale (en général, le réservoir de carburant) jusqu'aux roues du véhicule. Une chaîne de traction est définie par :

1. son architecture ;
2. le dimensionnement de ses composants.

Exemple : HONDA Insight à BVM. La chaîne de traction est constituée du moteur thermique, du moteur électrique, de la batterie, de la boîte de vitesse, de l'embrayage, du réducteur (différentiel).

Charge depleting Mode de gestion de la batterie dans lequel l'état de charge peut dériver jusqu'à une valeur donnée (fixée par le concepteur).

Charge sustaining Mode de gestion de la batterie dans lequel l'état de charge est flottant autour d'une valeur définie.

Consommation à bilan batterie nul Estimation de la consommation d'un véhicule hybride thermique-électrique pour laquelle le bilan en charge de la batterie à la fin du cycle est nul. Cette consommation permet de comparer directement les valeurs avec celles obtenues par un véhicule classique.

Couplage Dans un véhicule hybride, il s'agit du système permettant aux deux flux d'énergie provenant de la source d'énergie principale et du stockage d'énergie réversible du véhicule de se coupler, pour être transmis aux roues. Dans le cas de l'hybride thermique-électrique parallèle, le couplage est mécanique.

Dimensionnement Réglage des caractéristiques de tous les éléments de la chaîne de traction afin d'obtenir un ensemble cohérent. Par exemple, adaptation de la batterie au moteur électrique. Le dimensionnement est lié à un cahier des charges définis par le concepteur.

Downsizing du moteur thermique Le terme « downsizing» d'un moteur thermique peut avoir plusieurs signification[Sco02] :

- ▷ réduction de la cylindrée du moteur thermique mais conservation de la puissance maximale de ce dernier. Ceci conduit à une augmentation des rendements, mais aussi une augmentation des coûts de fabrication[PCLDvW01] ;
- ▷ réduction de l'encombrement du moteur thermique, en conservant les même caractéristiques ;
- ▷ réduction de la cylindrée en conservant les rendements. Il s'agit simplement de prendre un moteur de même technologie et moins puissant ;

Dans [DRST+04] est utilisée la troisième définition du downsizing, à savoir la réduction de la cyclindrée du moteur à technologie identique ; avec l'hypothèse que les rendements sont conservés.

Flux série Dans le présent rapport, on nomme flux série la recharge de la batterie par le moteur thermique directement (via une machine électrique). C'est l'un des deux modes de recharge batterie avec le freinage récupératif.

Freinage récupératif Le freinage récupératif est le freinage du véhicule par une machine électrique, qui absorbe l'énergie à la roue pour la restituer à la batterie du véhicule hybride thermique-électrique. Dans un véhicule classique, l'énergie du freinage est totalement dissipée en chaleur au niveau des systèmes mécaniques de freinage.

Recharge réseau (fonctionnement avec) Fonctionnement dans lequel la charge batterie dérive au cours de l'usage et est rechargée sur le réseau. S'oppose au fonctionnement à bilan stockeur nul. La consommation du véhicule se mesure alors en consommation de carburant + consommation d'énergie électrique. Ce type de fonctionnement implique une stratégie de gestion de l'état de charge batterie en « charge depleting ».

Stockage d'énergie réversible Stockage d'énergie réversible utilisé dans le véhicule hybride pour assister la source d'énergie principale. Le stockage d'énergie réversible possède moins d'énergie que le stockage principal.

Exemples : volant d'inertie, batterie, supercapacités, stockage oléo-pneumatique.

Source d'énergie principale Tout véhicule possède une source d'énergie principale, qui alimente le transformateur principal et assure l'autonomie du véhicule :

- ▷ véhicule classique : réservoir de carburant ;
- ▷ hybride sans recharge réseau : réservoir de carburant ;

Système de transmission Le système de transmission est la partie de la chaîne de traction qui conduit l'énergie du transformateur principal aux roues. Dans le cas d'un véhicule thermique classique, le système de transmission se limite à la transmission mécanique : embrayage, boîte de vitesse et réducteur. Pour la Prius, il contient tous les éléments suivants : Moteur électrique, Génératrice (MVV), train épicycloïdal, pont réducteur, batterie. Un système de transmission associé à un transformateur principal constitue une chaîne de traction.

Traction électrique Lorsque, dans un véhicule hybride thermique-électrique, la traction est uniquement assuré par la machine électrique (l'injection sur le moteur thermique est nulle), on parle de mode « traction électrique ».

Transformateur Principal Convertisseur qui transforme l'énergie de la source principale en énergie utilisable pour faire avancer le véhicule (en général, la transformation est irréversible) :

- ▷ Pour un véhicule classique : moteur thermique ;
- ▷ Pour un véhicule hybride thermique électrique : le moteur thermique ;
- ▷ Pour un hybride à pile à combustible : la pile.

Le transformateur principal, associé au système de transmission, constitue une chaîne de traction.

Véhicule Un véhicule est un ensemble composé d'une caisse "en blanc", d'une source d'énergie principale et d'une chaîne de traction.

ZEV (Zero Emission Vehicle) Possibilité de faire fonctionner un véhicule en mode tout électrique (sans usage du moteur thermique), par une action du conducteur ou d'un système extérieur (balise, etc.). L'autonomie ZEV est donnée en Europe et dans [DRST+04] selon les prescriptions des normes NF EN 1821-1 et NF EN 1821-2.

Annexe C

Rappel du principe de la climatisation

La climatisation automobile est constituée de deux circuits : le circuit d'air, et le circuit de réfrigérant.

Le circuit réfrigérant est composé de quatre éléments principaux : le compresseur, le condenseur, le détendeur, et l'évaporateur [Jal04, Bos00] (les valeurs données le sont à titre indicatif) :

- ▷ le compresseur (A->B) compresse le gaz réfrigérant de 3 à 16 bars, jusqu'à la pression de vapeur saturante, dans un processus supposé adiabatique. Le gaz haute pression sort à une température de 80°C. Un embrayage électromagnétique désolidarise la poulie entraînée par le moteur thermique au compresseur lorsque la climatisation n'est pas nécessaire, en hiver par exemple ;
- ▷ le condenseur (B->C) est situé devant le radiateur du liquide de refroidissement moteur, à l'avant du véhicule. Il permet au gaz réfrigérant de céder des calories (emmagasinées via le compresseur) à l'air ambiant, sur une isobare. La température du gaz réfrigérant diminue jusqu'à 55°C, il se liquéfie ;
- ▷ le détendeur (C->D) permet de relâcher la pression du fluide frigorigène en « hachant » le flux de liquide. Le processus est supposé adiabatique ;
- ▷ l'évaporateur (D->A), situé derrière le tableau de bord, permet au fluide liquide de s'évaporer en absorbant les calories de l'air extérieur, sur une isobare. En effet, grâce au détendeur, le fluide dispose du volume nécessaire à son évaporation.
  L'air extérieur se refroidit, et rentre dans l'habitacle. L'eau contenue dans l'air sous forme gazeuse se condense sur les parois de l'évaporateur. Un évaporateur peut ainsi condenser jusqu'à 3 litres d'eau à la minute. C'est pour cette raison que celui-ci est équipé d'un système d'évacuation de l'eau dans sa partie inférieure. Quand la climatisation fonctionne, de l'eau coule sous le véhicule.

L'aire du circuit ABCD correspond au travail à fournir pour le processus de réfrigération.

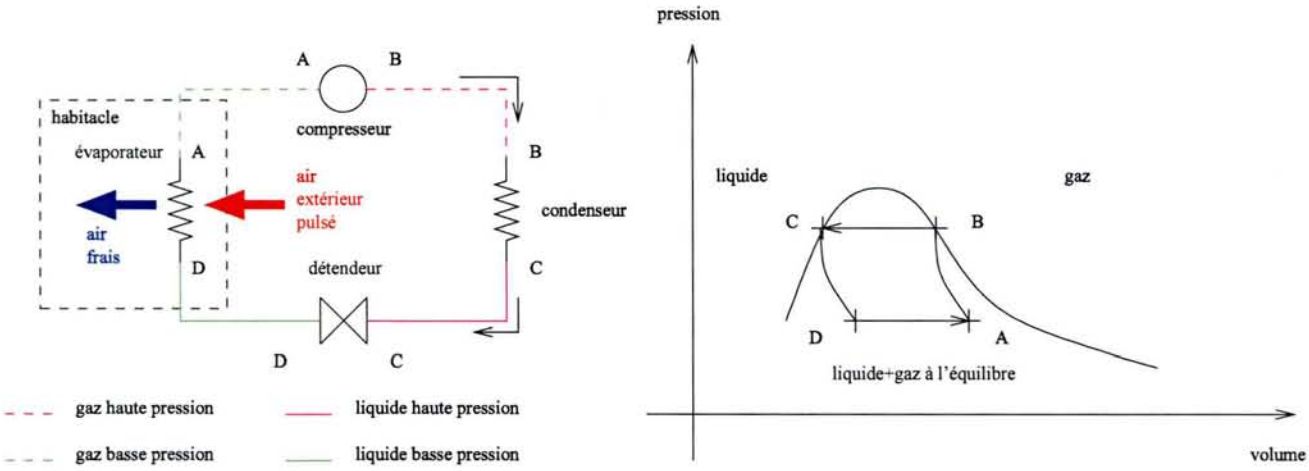


FIG. C.1: *Schéma de principe et diagramme thermodynamique du circuit de fluide de réfrigération dans une climatisation automobile*

Annexe D

Caractéristiques de quelques véhicules hybrides

Les caractéristiques des Honda Insight et Civic IMA, ainsi que de la Toyota Prius 2004, sont détaillées dans le tableau D.2 [col02, DRB04, MV03, HMC99, AKK+00, IMTA00] [65].

[65] Les cases vides correspondent à une information indisponible ou non trouvée.

Modèle	Honda Insight	Toyota Prius 2004	Honda Civic
architecture	parallèle 1 embrayage côté boîte	HPDP	parallèle 1 embrayage côté boît
réseau électrique 12V conservé batterie 12V ou hacheur	oui batterie	oui batterie+hacheur	
mode ZEV/autonomie	impossible	oui/	impossible
type de couplage mécanique	intégré	train épicycloïdal	intégré
organe de démultiplication plage de démultiplication correspondante	boîte 5 rapports ou CVT 3.46-0.71 ou 2.44-0.41	train épicycloïdal raison basique ? variation par génératrice ? kW	boîte 5 rapports ou CVT
rapport de démultiplication marche arrière	3.23 ou 4.36		
rapport de démultiplication différentiel	3.21 ou 5.69		
particularités	coupé 2 places carrosserie en aluminium démarreur 12V conservé		deux bougies par cylindre
masse à vide (kg)	840	1300	
Cx	0.25		
puissance totale de motorisation (kW)		82	69
catégorie		D	
100 km/h départ arrêté (s)	12	10.9	12.8
reprise 80-120 km/h (s)			
vitesse maximum (km/h)	180		
émissions CO_2 (g/km) (NEDC/ECE15/EUDC) consommation (l/100 km) (NEDC/ECE15/EUDC)	88// 3.72[MV03]//	104[DRB04]// 4.4//	116/115/108 4.9/4.9/4.6
type de moteur électrique	synchrone à aimants	synchrone à aimants	synchrone à aimants
tension maximale moteur électrique (V)		500	
puissance moteur électrique (kW@tr/min)	9.2@2000	50@1200	10@[2500-4000]
couple maximum moteur électrique (Nm@tr/min)	49@[0-1000]	400@[0-1200]	
puissance génératrice électrique si présente (kW)			
type de batterie	NiMH cylindrique	NiMH prismatique	NiMH cylindrique
masse (kg)	20	29	
nombre de monoblocs/connexion	120/série	28	120/série
tension nominale (V)	144	200	144
énergie (Ah) / capacité spécifique (Wh/kg)	6.5/	6,7/46	6.0/
puissance (kW) / puissance spécifique (W/kg)		38/1300	
position du pack batterie	fond du coffre	entre coffre et compartiment passager	
type de moteur thermique	essence atmo	essence atmo	essence atmo
cylindrée (l)/nombre de cylindres	1.0/3	1.5/4	1.3/4
taux de compression	10.8 :1	13.0 :1	10.8 :1
puissance moteur thermique (kW@tr/min)	51@5700	57@5000	63@5700
couple maximum moteur thermique (kW@tr/min)	97@4800	115@4200	120@3300
post-traitement	catalyseur 3 voies piège à NOx	catalyseur 3 voies	

TAB. D.2: *Caractéristiques de véhicules hybrides commercialisés en 2004*

Annexe E

Mesure de la consommation d'un véhicule par suivi de vitesse

Afin de pouvoir indiquer la consommation de carburant représentative d'un véhicule, ceux-ci sont passés sur banc à rouleau.

Le dispositif se présente sous la forme d'un rouleau sur lequel repose l'essieu moteur du véhicule. Le rouleau est relié mécaniquement à une génératrice qui permet de simuler, d'une part l'inertie véhicule, d'autre part les différentes forces de résistance à l'avancement : force aérodynamique et force de roulement, éventuellement force de gravité si l'on simule une pente. La force appliquée par la génératrice est donc du type :

$$F_{route} = K_1 + K_2 \cdot V + K_3 \cdot V^2 + K_4 \cdot g \cdot sin\alpha + K_4 \cdot \frac{dV}{dt}$$

avec[66] :

$$\begin{cases} K_1\text{: frottements fixes en N; } -500 < K_1 < 500 \\ K_2\text{: frottements visqueux en N/(m/s); } -20 < K_2 < 20 \\ K_3\text{: frottements arodynamiques en N/(m/s)}^2\text{; } -2 < K_3 < 2 \\ K_4\text{: masse du vehicule en kg;} \\ V\text{: vitesse du vehicule en m/s;} \\ \alpha\text{: pente de la route (max. : 20\%)} \end{cases}$$

La partie linéaire correspond à la force de roulement, la partie quadratique à la force aérodynamique. Les coefficients K_1 à K_3 sont déterminés par mesure du temps de décélération du véhicule sur piste, et sont la propriété des constructeurs. Des mesures de consommation sont réalisées par l'UTAC (Union des Techniques Automobiles et Cycles), qui s'occupe de l'homologation des véhicules, que ce soit en terme de pollution, d'acoustique, ou de compatibilité électromagnétique. Si l'essai du véhicule n'est pas réalisé dans le cadre d'un projet avec un constructeur, il est assez difficile d'obtenir les informations nécessaires au réglage du banc à rouleau. Celles-ci sont alors paramétrées par expérience.

Le coefficient K_4, c'est-à-dire la masse du véhicule, est calculé en tenant compte de normes [NF191, NF101a, NF101b, NF196, NF199, NF198, NF101c]. À l'INRETS, la masse entrée dans le calculateur du banc à rouleau est la masse à vide majorée d'une masse forfaitaire de 100kg.

[66] Possibilités maximum du banc à rouleau utilisé à l'INRETS LTE. Celui-ci est décrit plus en détail en §13.1.1 p.157.

Le véhicule est démarré normalement, ses pneumatiques entraînent le rouleau en rotation. La vitesse du véhicule est mesurée et affichée instantanément sur un écran disposé face au conducteur. Celui-ci essaie dans la mesure du possible de faire suivre au véhicule un profil vitesse-temps donné, appelé également CYCLE DE CONDUITE. Celui-ci est généralement défini par les coordonnées des points (vitesse,temps), toutes les secondes.

L'échappement du véhicule est relié à un système d'analyse (voir §13.1.3 p.159) qui permet de mesurer les émissions de polluants, en particulier celles de CO_2, directement proportionnelles à la consommation de carburant. Ces émissions sont généralement exprimées en g/km.

Le cycle de conduite qui a usage en Europe est normalisé [EEC90], il s'agit du cycle MVEG (figure E.1) . Il comprend quatre segments ECE15 (ou « UDC ») mis bout à bout, suivis d'un segment EUDC (« Extra-Urban Driving Cycle »). Le cycle ECE15 est un cycle représentant des conditions urbaines, caractérisé par des faibles vitesses véhicule, de faibles charges moteur, et une faible température des gaz d'échappement. En revanche, le cycle EUDC prend en compte des conditions de roulage à plus grande vitesse véhicule et charge moteur.

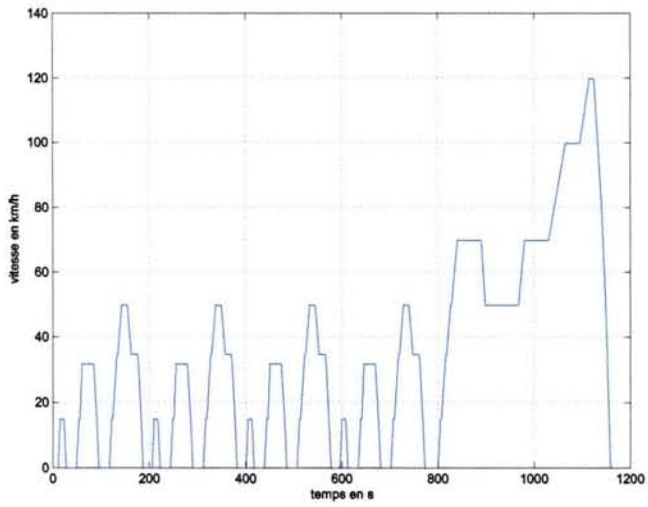


FIG. E.1: *Cycle MVEG (ou NEDC)*

Le cycle MVEG est associé à une suite des rapports de boîte que doit suivre le conducteur. Pendant la durée des changements de rapport de boîte, le conducteur peut s'éloigner de la cinématique. Le reste du temps, il doit rester proche de la vitesse de consigne avec une tolérance définie par la norme.

Au début du test, le véhicule est démarré et maintenu au ralenti pendant 40 secondes. Depuis l'an 2000, cette période de ralenti a été éliminée, c'est-à-dire que le moteur thermique démarre au début du cycle, en même temps que la collecte des émissions. Le cycle MVEG avec départ à froid est aussi appelé cycle NEDC (« New European Driving Cycle »).

Il existe des cycles plus représentatifs de l'usage réel du véhicule, par exemple ceux élaborés à l'INRETS, les cycles HYZEM et ARTEMIS [And02, And97].

Annexe F

Rappel d'automatique

Un système peut être assimilé à une boîte noire (e.g. radiateur électrique) sur laquelle agissent des variables EXOGÈNES (i.e. externes au système). Certaines variables exogènes sont telles qu'il est possible d'agir directement dessus : ce sont les VARIABLES DE COMMANDE (e.g. courant passant dans une résistance électrique) ; d'autres ne le sont pas, à moins de se donner des moyens suffisants (e.g. température dans la pièce). Les variables exogènes qui ne sont pas des variables de commande peuvent néanmoins parfois être mesurées ; elles peuvent par exemple être utilisées dans la conception de la commande qui va être appliquée au système.

Le système peut-être décrit à chaque instant par un ensemble de variables ENDOGÈNES. Habituellement, on se satisfera d'une connaissance imprécise du système, via un ensemble de variables endogènes sélectionnées, que l'on nommera VARIABLES D'ÉTAT. Il peut exister plusieurs manières de choisir ces variables d'état. Généralement, on peut observer ces variables, soit par mesure directe, soit en ESTIMANT leur valeur via la mesure d'autres variables endogènes, ou même exogènes[67]. Dans ce dernier cas, il sera nécessaire de connaître la ou les équation(s) d'évolution du système, ou encore ÉQUATION(S) D'ÉTAT.

Il est d'usage de choisir parmi l'ensemble des variables endogènes au système une ou plusieurs variables particulièrement intéressantes, ou bien représentant l' « utilité » du système dans un certain sens. Nous les nommerons SORTIES du système.

Si ce système d'équations comprenait assez d'équations pour décrire précisément le système, et si l'on connaissait de manière infiniment précise :

- ▷ l'ensemble des variables d'état à l'instant $t = t_0$;
- ▷ l'ensemble des commandes appliquées dans le futur pour $t \in [t_0; t_1]$;

alors il serait possible de prévoir le futur du système de manière exacte (c'est-à-dire la valeur des variables d'état et des sorties)[68]. Dans la pratique, ceci est évidemment impossible, du fait de la connaissance imprécise du système, et de la présence de perturbations environnementales[69].

[67] On parle d'estimateur, ou encore de reconstructeur d'état. Dans le cas DÉTERMINISTE, on le nomme OBSERVATEUR, dans le cas STOCHASTIQUE (lorsque l'environnement présente des perturbations aléatoires), FILTRE [BDTR+90]. Notons qu'une mesure directe peut être considérée comme une estimation, dans le sens où le capteur parfait n'existe pas.

[68] On se place ici dans le cas déterministe, c'est-à-dire que l'ensemble des variables endogènes et exogènes ne sont pas soumise à des perturbations aléatoires (cas stochastique).

[69] Cas stochastique.

Un point important est qu'il est souvent possible de décrire un système de multiples manières suivant les variables d'état et de sorties choisies. Par exemple il existe des systèmes ne comprenant pas de sortie évidente. Dans ce cas, on pourra tout simplement fixer par convention une sortie égale au vecteur de variables d'état. Notons aussi que l'on peut déplacer une variable endogène au système en une variable exogène qui pourra être une variable de commande, ou bien faire partie des autres variables exogènes. On peut aussi imaginer que le système ne comprenne pas de variable d'état qui nous intéresse.

Les définitions précédentes sont illustrées par la figure F.1.

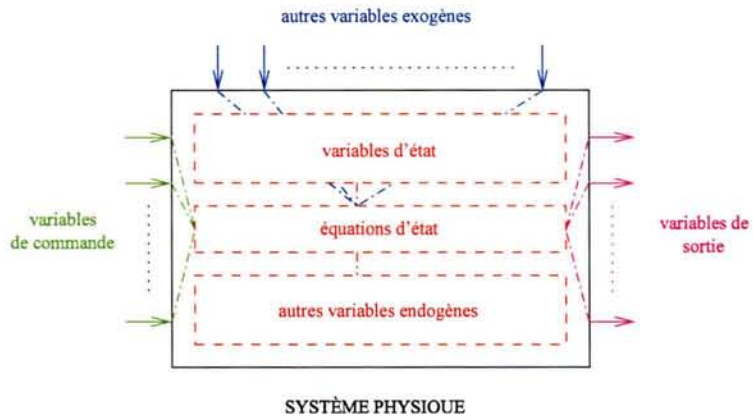


FIG. F.1: *Système automatique*

Le problème de l'automatique est d'amener le système d'un état A à un état B, via la commande ou les commandes adaptée. Généralement, on aura besoin d'un certain nombre de variables endogènes et exogènes pour calculer la commande à appliquer.

Lorsqu'on veut établir une commande permettant d'atteindre B en partant de A, deux possibilités sont offertes :

- ▷ ne pas tenir compte de l'état courant du système pour établir la commande : il s'agit de la commande en BOUCLE OUVERTE. Celle-ci demande peu de moyens de calcul et d'encombrement mémoire, mais lorsqu'on est dans un environnement stochastique (i.e. la réalité), elle n'est que rarement adaptée, car peu robuste à des perturbations sur l'entrée, la sortie, ou bien le modèle (i.e. imprécision sur le modèle) ;
- ▷ sinon, il s'agit de commande en BOUCLE FERMÉE. Dans ce cas, il va falloir estimer les variables d'état du système ; les estimations correspondantes doivent faire partie des variables de sortie. Celles-ci peuvent néanmoins être insuffisantes pour stabiliser le système autour d'un état donné. On peut obtenir un système stable[70] en boucle fermée via diverses techniques, par exemple le PLACEMENT DE PÔLES.

Notons les points suivants lorsqu'on travaille en boucle ouverte :

- ▷ il n'existe pas forcément de commande permettant d'atteindre B en partant de A. Ceci appelle la notion de COMMANDABILITÉ. Si le système est commandable entre A et B, c'est-à-dire s'il est possible d'atteindre B en partant de A, il se peut néanmoins qu'il ne soit pas possible d'y rester de manière permanente. Ceci appelle la notion de STABILITÉ ;

[70]Diverses grandeurs définies en automatique renseignent sur la stabilité d'un système : marge de phase, marge de gain, etc.

▷ il est possible que la connaissance de l'équation d'évolution du système et des commandes appliquées, ainsi que l'observation des sorties ne suffise pas à la détermination de la valeur des variables d'état du système. Cela appelle la notion D'OBSERVABILITÉ. Si le système est observable, c'est-à-dire s'il est possible d'estimer la valeur des variables d'état du système, il est néanmoins possible que ces estimations ne soient pas asymptotiquement stables. Cela appelle la notion de DÉTECTABILITÉ.

Les notions de commandabilité/stabilité sont duales de celles d'observabilité/détectabilité.

Si un certain nombre de commandes pour mener le système d'un état A à un état B sont possibles, il peut être intéressant de choisir celle qui minimise un critère de coût, la plupart du temps énergétique.

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11
54601 VILLERS-LES-NANCY Cédex

Annexe G

Calcul des variations et application au travers de la commande optimale des systèmes

G.1 Calcul de trajectoire optimale via le calcul des variations

Le calcul des variations d'une fonctionnelle permet d'aborder des problèmes où l'inconnue est une courbe dont on désire déterminer l'équation, sachant qu'en parallèle on veut optimiser une grandeur sous un certain nombre de contraintes.

Ainsi, nous nous plaçons dans des espaces vectoriels normés de fonctions à valeurs réelles : il s'agit d'optimisation dans des espaces de dimension infinie. Contrairement à la recherche de minimum d'une fonction connue respectant un certain nombre de conditions (via des méthodes de type gradient ou Newton [Vin98]), on n'est jamais sûr que le problème admette une solution avant de l'avoir trouvée.

Le problème le plus simple consiste à déterminer l'équation d'une courbe $t \mapsto y^\star(t)$ de $\mathcal{C}^1(D, \mathbb{R})$ ($D \subset \mathbb{R}$), satisfaisant des conditions aux bords (par exemple, si $D = [a; b]$, $y(a) = y_A$ et $y(b) = y_B$), et minimisant un critère du type

$$J(y) = \int_D L(y(t), y^{'}(t), t) \cdot dt \tag{G.1}$$

$L : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ est appelée FONCTION DE LAGRANGE, supposée $\mathcal{C}^2(D, \mathbb{R})$ par rapport à ses deux premiers arguments et $\mathcal{C}^1(D, \mathbb{R})$ par rapport au troisième. Afin de déterminer $y^\star$, l'idée est de remplacer, dans le critère G.1, y par une perturbation $y + \epsilon z$, calculer au premier ordre la variation de J correspondante $\delta J(y, z)$, écrire qu'elle est nulle pour le $y^\star$ recherché. Par intégration par parties puis application d'un lemme approprié (Bois Reymond pour [Cul94], Lagrange pour [BDTR+90]), on déduit l'ÉQUATION D'EULER :

$$L_y(y, y^{'}, t) = \frac{d}{dt} L_{y^{'}}(y, y^{'}, t)$$

Où $L_.$ est la dérivée partielle de la fonction de Lagrange par rapport à la variable correspondante.

L'équation d'Euler correspond à une condition nécessaire d'optimalité : elle permet de calculer *un extrémum du problème de calcul des variations.* L'extrémum en question peut aussi bien être un minimum, un maximum, ou un point selle. Une condition suffisante peut être obtenue via des conditions de convexité ou en posant un problème secondaire (condition suffisante de Jacobi).

Suivant la dépendance ou non de la fonction de Lagrange $L(y(t), y'(t), t)$ en y, y', ou t, plusieurs cas se présentent. Par exemple, si elle ne dépend pas de t, on définit le Hamiltonien, qui conduit au principe de Hamilton utilisé en mécanique.

Il est possible d'ajouter au problème divers types de contraintes (conditions de transversalité, contrainte intégrale sur la trajectoire, etc.).

G.2 Commande optimale d'un système via le calcul des variations

Si l'on considère un système commandé par $u(t)$, de variable d'état $x(t)$, régi par une équation d'état $\dot{x} = f(x(t), u(t), t)$ dans le cas continu ($x(t+1) = f(x(t), u(t), t)$) dans le cas discret), sa sortie étant donnée par $y(t) = b(x(t), t)$, l'objectif est d'amener son état d'une valeur initiale x_0 à une valeur finale x_f, en minimisant un critère $J(u) = \int_{t_0}^{t_f} g(x(t), u(t), t) \cdot dt$ par rapport à la commande $u(t)$, et un ensemble de choses étant prises en compte :

- ▷ l'équation d'état du système ;
- ▷ un ensemble de contraintes étant satisfaites, dépendant de la commande ou pas ;
- ▷ les commandes pouvant être limitées à un ensemble admissible.

Par un raisonnement identique à celui présenté en §G.1, le calcul des variations débouche sur le principe du MAXIMUM DE PONTRYAGUINE. Celui-ci est énoncé dans [Cul94].

Annexe H

Réducteur et inertie du secondaire vue au primaire

Soit un pignon E_1 lié à un système tournant d'inertie J_1 et E_2 lié à un système tournant d'inertie J_2. E_1 et E_2 engrènent avec un rapport de réduction k tel que :

$$\begin{cases} \Omega_2 = k \cdot \Omega_1 \\ \Gamma_1 = k \cdot \Gamma_2 \end{cases}$$

On peut écrire l'équation de la dynamique soit sur l'arbre de l'engrenage E_1, soit sur l'arbre de l'engrenage E_2 :

$$\begin{cases} \Gamma_1 - \Gamma_{2_{ram}} = (J_1 + J_{2_{ram}}) \cdot \frac{d\Omega_1}{dt} & \text{sur l'arbre de } E_1 \\ \Gamma_{1_{ram}} - \Gamma_2 = (J_{1_{ram}} + J_2) \cdot \frac{d\Omega_2}{dt} & \text{sur l'arbre de } E_2 \end{cases}$$

$\Gamma_{2_{ram}}$ (resp. $\Gamma_{1_{ram}}$) représente le couple Γ_2 (resp. Γ_1) ramené sur l'arbre de E_1 (resp. E_2). $J_{2_{ram}}$ (resp. $J_{1_{ram}}$) représente l'inertie J_2 (resp. J_1) ramenée sur l'arbre de E_1 (resp. E_2).

Choisissons de nous ramener sur l'arbre de E_1. On a $\Gamma_{2_{ram}} = k \cdot \Gamma_2$. Quant à l'inertie, elle peut se déduire de la conservation de l'énergie cinétique à un "rendement" $\nu < 1$ près :

$$\frac{1}{2} \cdot J_{2_{ram}} \cdot \Omega_1^2 = \nu \cdot \frac{1}{2} \cdot J_2 \cdot \Omega_2^2$$

Or, $\Omega_2 = k \cdot \Omega_1$, donc $J_{2_{ram}} = \nu \cdot J_2 \cdot k^2$.

ν n'est pas un rendement tel qu'on peut le concevoir habituellement. ν sert à exprimer le fait que lorsqu'on écrit l'équation de la dynamique, l'énergie cinétique des inerties amont ou aval ramenée au point considéré est toujours plus faible que l'originelle, justement à cause des pertes de vitesse dans le réducteur. Le lien avec le rendement en vitesse η_Ω existe donc, mais il n'est pas total puisque la valeur de ν *ne dépend pas du sens du flux énergétique.* Ainsi, si l'on avait choisi de nous ramener sur l'arbre de E_2, pour un même sens du flux énergétique, ν aurait aussi été introduit comme grandeur inférieure à l'unité. Comme la vitesse intervient au carré dans l'énergie cinétique, on peut écrire :

$$\nu = \eta_\Omega^2$$

Si $\eta_\Omega = \eta_\Gamma = \sqrt{\eta_p}$, alors ν est égal au rendement en puissance $\eta_p = \eta_\Gamma \cdot \eta_\Omega$.

Le raisonnement précédent n'équivaut pas à dire que l'énergie cinétique se conserve le long de la chaîne de traction, mais que l'inertie du système tournant lié à E_2 est vue de la même manière (i.e. avec le même montant énergétique) en tous les points où elle peut se faire sentir via une autre vitesse de rotation, avec un "rendement" ν près.

En réalité, si l'on introduit ν, et puisque ν dépend de η_Ω, il faut aussi introduire η_Γ (resp. η_Ω) dans les relations entre couples (resp. vitesses) amont et aval (nous ne l'avions pas fait par souci didactique). Cela nous oblige à considérer deux cas : si Γ_1 est positif (flux énergétique descendant, phase de traction) ou Γ_2 négatif (flux énergétique montant, phase de récupération). On obtient donc finalement, en se ramenant à l'arbre de E_1 :

▷ si $\Gamma_1 > 0$: $\left\{ \begin{array}{c} \Gamma_2 = \frac{\eta_\Gamma \cdot \Gamma_1}{k} \\ \Omega_2 = \eta_\Omega \cdot k \cdot \Omega_1 \end{array} \right.$ d'où $\left\{ \begin{array}{c} \Gamma_{2_{ram}} = \frac{k \cdot \Gamma_2}{\eta_\Gamma} \\ J_{2_{ram}} = \nu \cdot J_2 \cdot k^2 \end{array} \right.$ et finalement :

$$\Gamma_1 - \frac{k \cdot \Gamma_2}{\eta_\Gamma} = (J_1 + \nu \cdot J_2 \cdot k^2) \cdot \frac{d\Omega_1}{dt}$$

▷ si $\Gamma_2 < 0$: $\left\{ \begin{array}{c} \Gamma_1 = \eta_\Gamma \cdot k \cdot \Gamma_2 \\ \Omega_1 = \frac{\eta_\Omega \cdot \Omega_2}{k} \end{array} \right.$ d'où $\left\{ \begin{array}{c} \Gamma_{2_{ram}} = \eta_\Gamma \cdot k \cdot \Gamma_2 \\ J_{2_{ram}} = \nu \cdot J_2 \cdot k^2 \end{array} \right.$ et finalement :

$$\Gamma_1 - \eta_\Gamma \cdot k \cdot \Gamma_2 = (J_1 + \nu \cdot J_2 \cdot k^2) \cdot \frac{d\Omega_1}{dt}$$

La version simplifiée, sans aucun rendement, donne :

$$\Gamma_1 - k \cdot \Gamma_2 = (J_1 + J_2 \cdot k^2) \cdot \frac{d\Omega_1}{dt}$$

Annexe I

Démarrage du moteur thermique

À l'arrêt du MT (vitesse nulle), le couple est nul sur le vilebrequin (sans quoi il démarrerait en sens inverse). Cependant, il y a bien un couple résistant qui nous empêche de le démarrer à la main.

Ceci s'explique par le phénomène de frottement, modélisé couramment par un cône ayant pour sommet le point de contact considéré : si l'on tente de pousser un rocher, le vecteur de réaction du sol se décale de la normale, mais tant qu'il reste dans le cône, le rocher reste immobile. Une fois qu'il commence à se déplacer, le vecteur de réaction reste collé sur le cône de frottement, et la force résistante reste constante. En fait, dans le cas du moteur thermique, cette force ne reste pas constante car le coefficient de frottement est fonction de la vitesse : $\tan\phi(\Omega) = \mu(\Omega)$, à cause de l'effet d'aquaplanning dû à la lubrification par l'huile moteur.

Ainsi, pour pouvoir atteindre la vitesse de ralenti du moteur thermique, un couple moteur électrique $\Gamma_{ME}(\Omega_{MT})$ supérieur au couple de frottement $\Gamma_{MT}(\Omega_{MT})$ doit être appliqué pour $\Omega_{MT} < \Omega_{MT_{min}}$. En écrivant la seconde loi de Newton pour système tournant lors du démarrage, en se plaçant sur l'arbre du moteur thermique :

$$k \cdot \Gamma_{ME}(\Omega_{MT}) - \Gamma_{MT_{min}}(\Omega_{MT}) = (k^2 \cdot J_{ME} + J_{MT}) \cdot \frac{d\Omega_{MT}}{dt}$$

Remplaçons $\frac{d\Omega_{MT}}{dt}$ par $\frac{\Delta\Omega}{\Delta t}$, $\Delta\Omega$ étant la différence de vitesse pour atteindre le régime de ralenti (de l'ordre de $800\,\mathrm{tr}\cdot\mathrm{min}^{-1}$) et Δt le temps pour y parvenir. Si l'on connaît la courbe de frein moteur $\Gamma_{MT_{min}}(\Omega_{MT})$ et le rapport de réduction k, et si on désire une courbe de montée en vitesse donnée, on peut déduire le couple Γ_{ME} à fournir avec le moteur électrique à chaque instant (en fonction des caractéristiques de la machine). Ou bien si l'on connaît les caractéristiques du ME, on peut déduire le rapport de réduction k nécessaire.

Les forces à appliquer pour démarrer le moteur thermique sont de l'ordre de $150\,Nm$. Par exemple, l'alterno-démarreur intégré VALEO ISA [PCLDvW01] ne peut développer qu'environ $50\,Nm$ en mode alternateur (régime permanent), mais peut monter effectivement à $150\,Nm$ en mode démarreur (impulsion).

Au niveau de la commande du moteur électrique, le mode démarreur correspond à un rapport cyclique d'ouverture des interrupteurs maximum, à une non-limitation du courant (donc du couple) dans les enroulements, sachant qu'il a tendance à monter vite et haut puisque l'impédance vue est presque uniquement résistive ($jL\omega$ faible puisque ω faible). En mode alternateur, le

problème se pose moins puisque l'impédance est plus importante, mais on peut éventuellement introduire une limitation des rapports cycliques.

Annexe J

Influence de l'inertie des parties tournantes dans KOALA

On rappelle les relations établies dans l'annexe G.2 :

$$\begin{cases} \Gamma_1 - \Gamma_{2_{ram}} = (J_1 + J_{2_{ram}}) \cdot \frac{d\Omega_1}{dt} & \text{sur l'arbre de} E_1 \\ \Gamma_{1_{ram}} - \Gamma_2 = (J_{1_{ram}} + J_2) \cdot \frac{d\Omega_2}{dt} & \text{sur l'arbre de} E_2 \end{cases}$$

Soit, sur l'arbre E_2 :

$$k \cdot \Gamma_1 - \Gamma_2 = (J_1 \cdot k^2 + J_2) \cdot \frac{d\Omega_2}{dt}$$

Nous abordons ici le problème posé par le calcul du couple Γ_1 au niveau des moteurs électriques et thermiques, nécessaire pour satisfaire un profil de couple à la roue Γ_2 connu.

On connaît $\frac{d\Omega_2}{dt}$. On connaît Γ_2 à chaque instant (forces de résistance sur le véhicule), en supposant que l'on suit parfaitement la vitesse du cycle. Si l'on considère une boîte à rapport unique et unitaire (transmission directe), l'inertie vue à la roue est $J_1 + J_2$ à chaque instant, on en déduit donc Γ_1 :

$$\Gamma_1 = \Gamma_2 + (J_1 + J_2) \cdot \frac{d\Omega_2}{dt}$$

Un problème survient si le rapport k n'est pas constant, ce qui est le cas dans KOALA puisque le rapport de boîte est un résultat de l'optimisation globale. Dans ce cas, le terme $J_1 \cdot k^2$ varie suivant le rapport engagé. Si l'on ne tient pas compte de cette variation, cela peut faire une différence de l'ordre de $10\,\mathrm{N \cdot m}$ sur Γ_1 pour un cycle avec une dynamique de type NEDC. D'où l'idée de prendre un $J_1 \cdot k^2$ moyen.

Le fait de ne pas prendre en compte les inerties dans KOALA est une approximation dont l'effet a été analysé conjointement avec M. Desbois-Renaudin et R. Trigui. L'étude est présentée dans les quelques pages suivantes.

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11

FICHE DE TRAVAUX

Validation de Koala avec VEHLIB

Matthieu Desbois-Renaudin
Rochdi Trigui
Julien Scordia

Objectif :

Valider les résultats de consommation de carburant et d'énergie électrique de Koala avec un modèle simplifié de VEHLIB, puis mesurer les écarts avec VEHLIB dus à l'augmentation de la précision du moodèle.

Déroulement de l'étude :

Au 20 juillet 2003, nous avons focalisé nos efforts sur la réalisation d'un modèle simplifié de VEHLIB, avec les mêmes hypothèses que Koala. La mesure des écarts avec VEHLIB dus à l'augmentation de la précision du modèle n'a pas encore été effectuée.

Première phase de validation :

- Validation des transferts de données VEHLIB – Koala,
- Validation des hypothèses de Koala,
- Validation du suivi de cycle dans Koala,
- Différences dues aux hypothèses statiques de Koala (régime permanent),
- Différences dues à la différence entre le modèle « backward » (Koala) et le modèle « forward » (VEHLIB).

Cette première phase s'effectue en récupérant les résultats de répartition de couple de Koala et en les injectant dans VEHLIB. Nous appellerons ce procédé boucle ouverte, puisqu'aucun retour sur la vitesse effective du véhicule n'est utilisé pour coller au cycle.

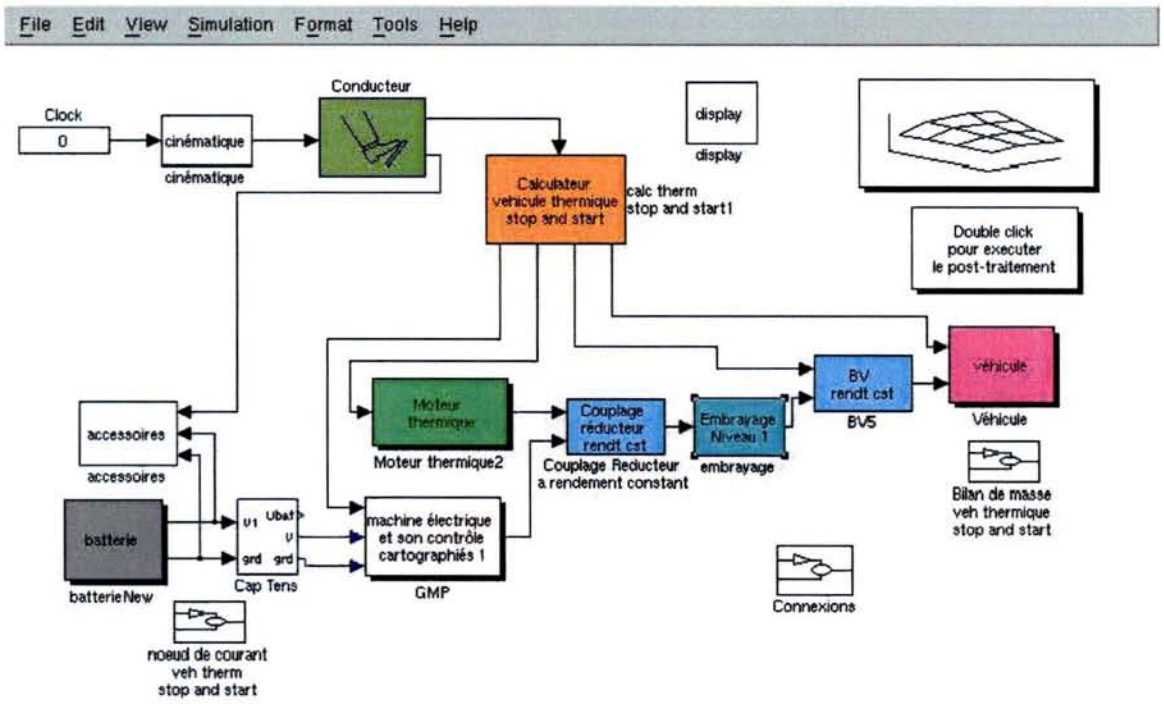
En boucle ouverte, nous récupérons dans les résultats de Koala les valeurs suivantes :

- Couple moteur thermique,
- Couple moteur électrique,
- Couple de freinage (frein mécanique),
- Rapport de boîte engagé.

Ensuite, un modèle d'hybride parallèle avec un embrayage est adapté afin de pouvoir faire tourner le modèle avec les valeurs énoncées ci dessus. Le modèle d'embrayage de VEHLIB est adapté afin de correspondre au modèle de Koala.

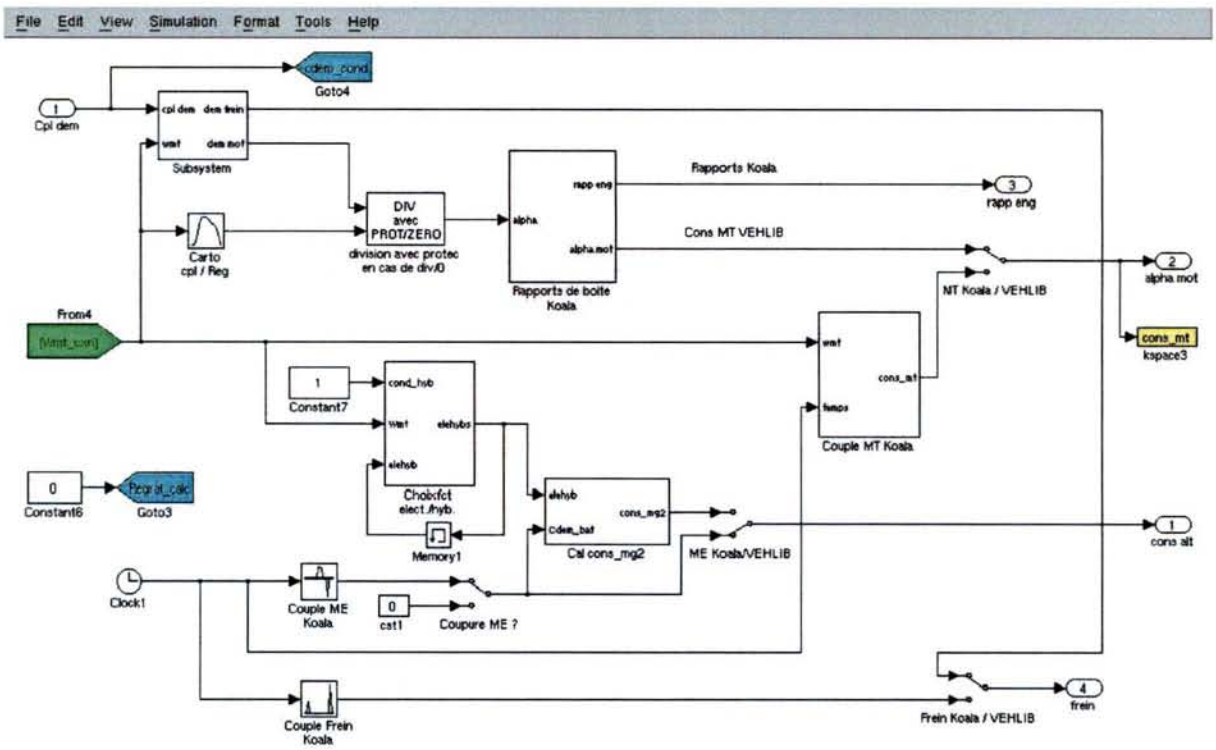
Le modèle simulink es t exposé dans les figures suivantes.

Figure 1 : Modèle Simulink VEHLIB adapté pour récupérer les couples de Koala



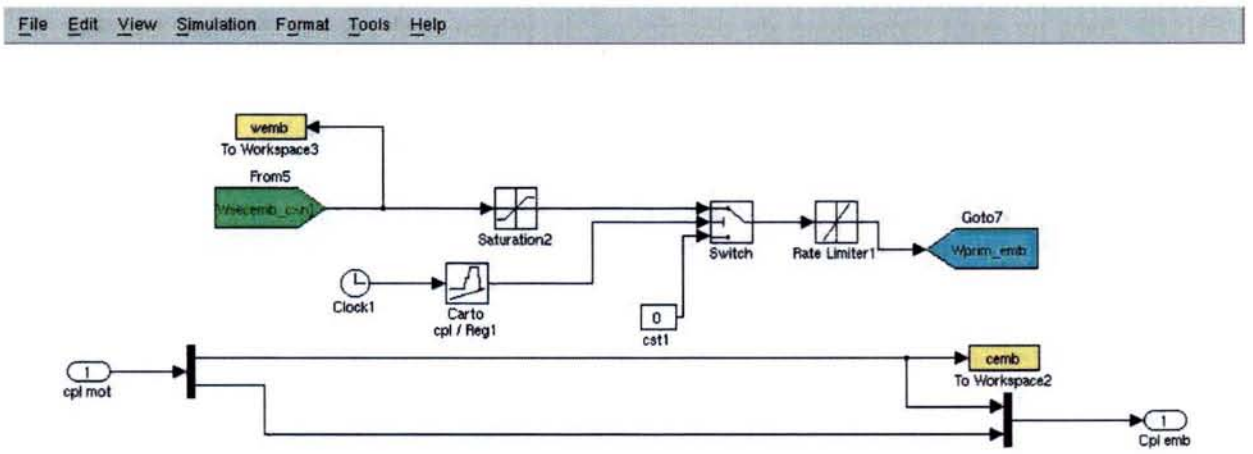
Seul le modèle d'embrayage et le calculateur sont modifiés par rapport au modèle VEHLIB.

Figure 2 : Calculateur adapté pour récupérer les couples de Koala



Les « switchs » manuels permettent de passer de la boucle ouverte à la régulation.

Figure 3 : Modèle simplifié d'embrayage adapté pour Koala :



Il est à noter que ce modèle d'embrayage n'est pas celui qui était implémenté dans Koala au début. En effet, le précédent modèle était un modèle avec un rendement fixe en puissance. Le modèle de la figure 3 présente le net avantage d'être plus proche de la réalité et de donner de meilleurs résultats. Il a été développé suite aux écarts trouvés dans le suivi de cycle entre VEHLIB et Koala.

Le modèle d'embrayage de Koala a été corrigé afin de correspondre à celui de la figure 3 et le suivi de cycle s'est avéré bien meilleur.

Divers problèmes d'entrée/sortie ont aussi put être reglé lors de cette phase de validation (correction sur le rayon des pneus du véhicule...).

On notera que pour avoir une uniformité avec Koala, le pas de calcul de VEHLIB est fixé à 1 s.

Rappel sur les interactions VEHLIB / Koala :

VEHLIB étant un outil dynamique de description de véhicule, il permet de dimensionner les chaînes de traction et d'évaluer leur performances. Koala est un outil d'optimisation globale de consommation sur un cycle entier; il nécessite comme donnée d'entrée les couples et vitesses de rotation à la roue pour le cycle et le véhicule à étudier. Ces valeurs lui sont founis par VEHLIB.

La façon dont VEHLIB est construit, impose à l'équation du mouvement d'être résolu au niveau de la roue du véhicule. Ainsi, le couple à la roue dans VEHLIB tient compte :

- des forces de roulement,
- des forces aérodynamiques,
- de l'inertie du véhicule ramenée à la roue,
- de l'inertie des moteurs électrique et thermique ramenées à la roue.

En ce qui concerne la prise en compte de l'inertie des moteur électrique et thermique, le problème s'avère insoluble puisqu'il faut connaitre quels vont être les rapports de boîte de vitesse choisis pour connaitre l'influence de ces inerties sur le couple à la roue. Or, ces rapports sont choisis par Koala pour optimiser la consommation.

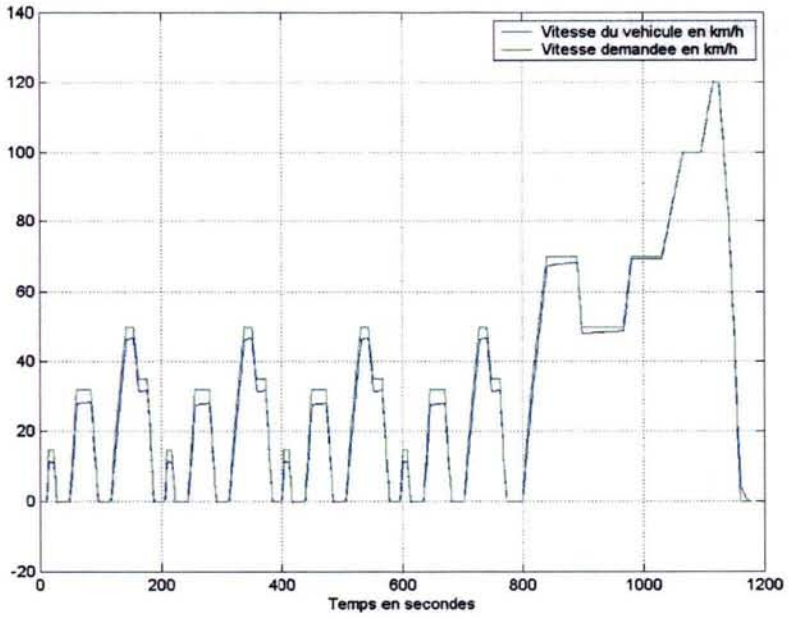
La solution retenue pour ce problème est de donner à Koala le couple et la vitesse à la roue d'un véhicule électrique surdimensionné dont le moteur a une inertie équivalente à celle des moteurs thermique et électrique.

Le véhicule est surdimensionné afin d'assurer un suivi de cycle aussi fidèle que possible. Etant électrique, il n'y a aucun changement de rapport de boîte et donc pas de discontinuité dans le suivi de cycle. En outre, l'inertie du moteur électrique ajustée ($J = J_{MT} + k^2 J_{ME}$) représente l'inertie moyenne des moteurs sur le cycle et permet une bonne approche énergétique.

Cependant, l'inertie des moteurs peut avoir un impact sur le comportement dynamique du véhicule, notamment dans les phases d'accélération où les énergies en jeu sont faibles. L'énergie cinétique emmagasinnée par le vilebrequin en première peut être du même ordre de grandeur que l'énergie emmagasinnée par le véhicule dans le même temps.

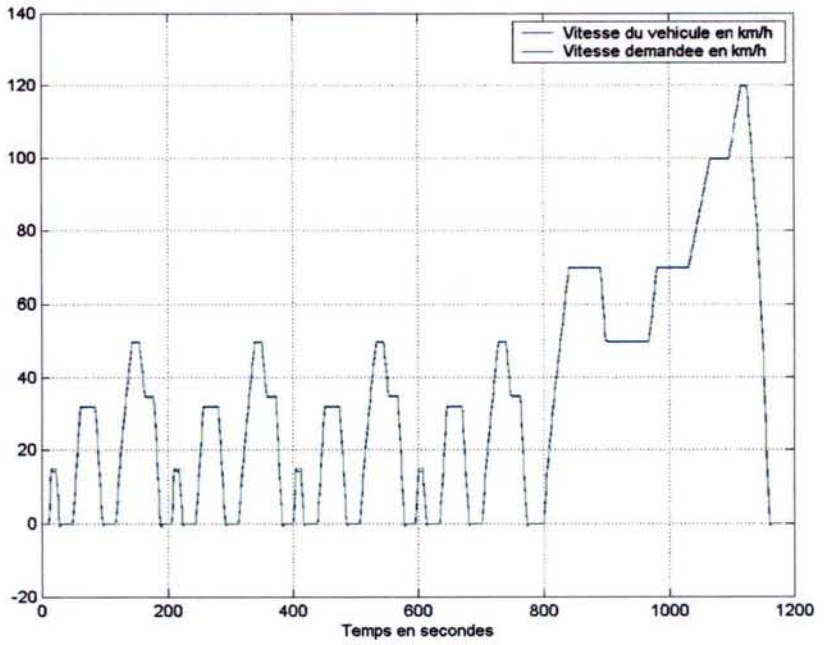
Résultats de suivi de cycle en boucle ouverte :

Figure 4 : Cycle NEDC en boucle ouverte - inertie des moteurs considérée



Comme expliqué au paragraphe précédent, il se peut que la différence de suivi de cycle soit due aux inerties des moteurs thermique et électrique. Pour vérifier cette hypothèse, nous décidons donc d'annuler les inerties dans VEHLIB aussi bien pour la génération de données pour Koala, que pour la validation des résultats avec le modèle simplifié de VEHLIB. Les résultats obtenus sont visibles en figure 5.

Figure 5 : Cycle NEDC en boucle ouverte – inertie des moteurs nulle



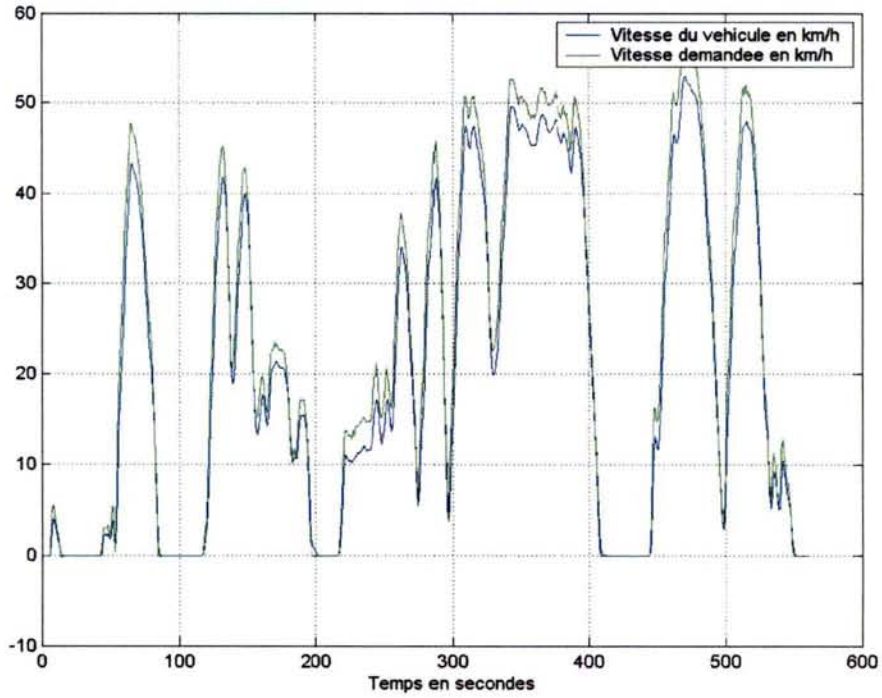
Etant donnés les excellents résultats obtenus en figure 5, nous attribuons la cause des écarts constatés figure 4 aux problèmes liés à la considération des inerties de moteurs dans Koala.

Nous avons maintenant montré que les résultats de Koala sont cohérents en ce qui concerne les répartitions de couple, étant donné les hypothèses suivantes :

- Embrayage simplifié,
- Changement de rapport instantané,
- Pas de calcul fixe à une seconde,
- Pas de prise en considération de l'inertie des moteurs,
- et toutes les hypothèses propres à VEHLIB.

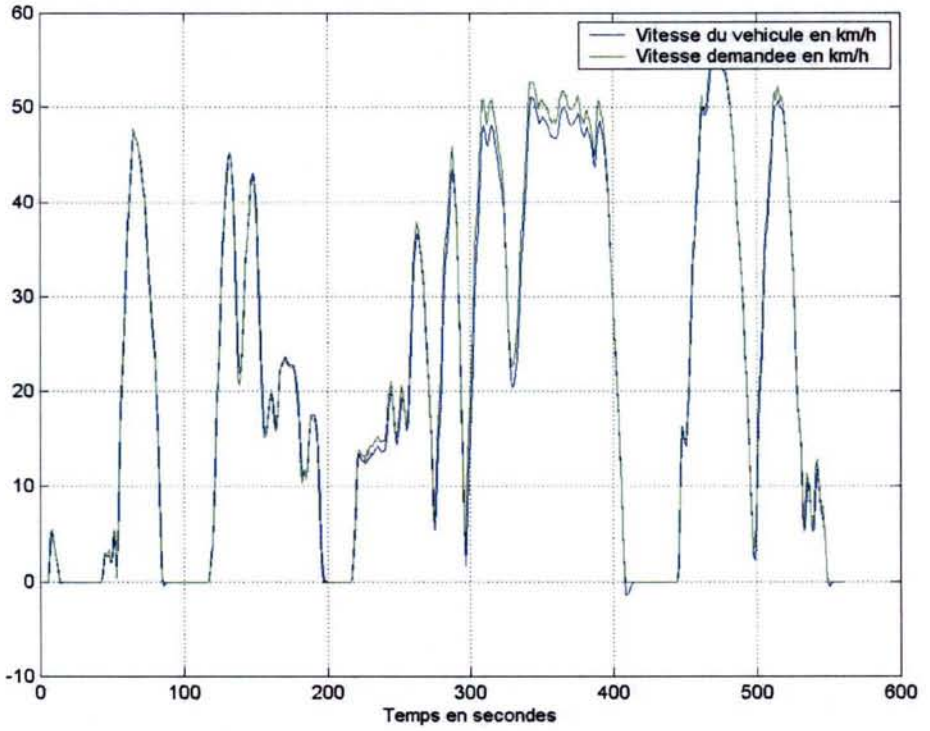
Nous décidons de vérifier ces constats sur un cycle d'usage réel (figures 6 et 7).

Figure 6 – Cycle Hyzem Urbain en boucle ouverte – Inertie des moteurs considérée



Les écarts de vitesse sont cette fois-ci encore plus marqués. Ceci est probablement du aux solicitations dynamiques plus importantes dans le cycle d'usage réel. Néanmoins, l'allure générale du cycle est respectée.

Figure 7 – Cycle Hyzem Urbain en boucle ouverte – Inertie des moteurs nulle



On remarque que les résultats obtenus dans Koala permettent de suivre nettement mieux le cycle avec une inertie des moteurs nulle. Néanmoins, il reste quelques endroits où l'on peut observer de légers écarts entre la consigne et le résultat. La raison précise de ces écarts n'a pas été étudiée. On peut penser que le passage d'un modèle « backward » à un modèle « forward » peut engendrer quelques écarts, fonctions de l'algorithme de résolution utilisé. En effet, un léger décalage sur un pas de calcul se ressent forcément sur tout le microcycle qui suit étant donné que nous sommes en boucle ouverte.

Résultats en consommation de carburant et d'énergie électrique :

Dans un premier temps, nous étudions les consommations données par VEHLIB et Koala pour les modèles où les inerties moteur sont nulles. Les résultats obtenus sont exposés dans le tableau 1.

Tableau 1 – Consommations sous VEHLIB simplifié et Koala.
Cycles en boucle ouverte et inertie moteurs nulle

Cycles	*Koala*		*VEHLIB*	
NEDC	3,94 L/100 km	0,00 As	3,93 L/100km	-85 As
Hyzem Urbain	4,44 L/100km	0,00 As	4,43 L/100 km	-111 As

Les résultats nous semblent d'une précision satisfaisante. En effet, 111 As correspond à un écart de SOC (State Of Charge) de la batterie de 0,47 % pour la batterie utilisée (Panasonic NiMH 6,5 Ah). Il est à noter que le modèle de batterie de VEHLIB simplifié a une tension à vide constante afin de correspondre au mieux au modèle Koala. Cette hypothèse est bonne puisque le chemin optimum fournit par Koala sollicite peu la batterie en SOC (autour de 5 %).

Afin de mesurer l'impact des inerties des moteurs sur la consommation, nous proposons de reprendre la configuration des figure 4 et 6 (inerties considérées) et d'y ajouter une régulation du couple sur le moteur thermique afin d'assurer le suivi de cycle. Le surplus de consommation obtenu nous permettra de quantifier l'erreur due à ces inerties moteur. Il est à noter que le pas de calcul ne peut plus être fixe à 1s dans le modèle de VEHLIB simplifié, sans quoi les boucles de régulations sont de mauvaises qualité. Les figures 8 et 9 montrent que le suivi de cycle est bon cette fois-ci (à comparer avec les figures respectives 4 et 6). Le tableau 2 permet de comparer les consommations.

Figure 8 – Cycle NEDC avec régulation du couple moteur thermique et du frein mécanique

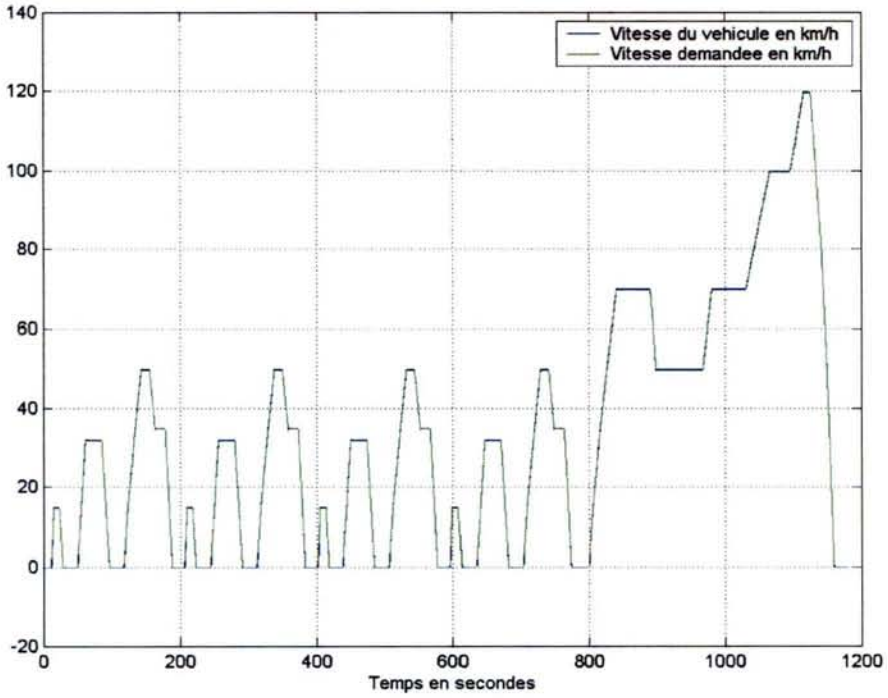


Figure 9 – Cycle Hysem Urbain avec régulation du couple moteur thermique et du frein mécanique

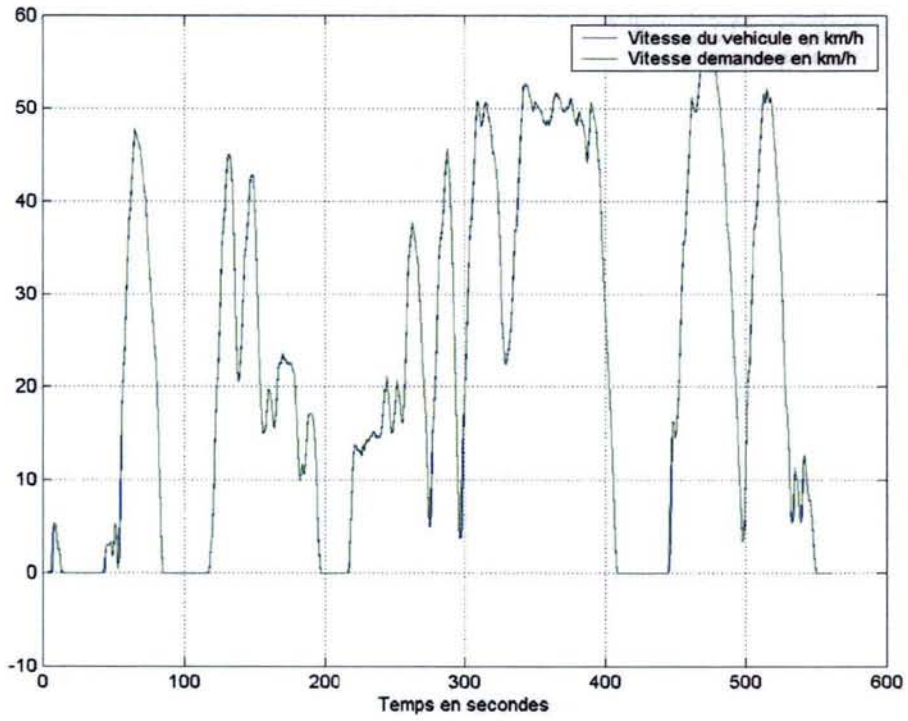


Tableau 2 – Consommations sous VEHLIB simplifié et Koala.
Cycles en boucle ouverte
Avec régulation du couple moteur thermique et du frein mécanique
Inertie moteurs considérée

Cycles	***Koala***		***VEHLIB***	
NEDC	3,97 L/100 km	0,00 As	3,99 L/100km	-50 As
Hyzem Urbain	4,53 L/100km	0,00 As	4,71 L/100 km	-69 As

Les écarts de consommation sont faibles (69 As <=> 0,29 % SOC). On peut donc penser, en première approximation que les hypothèses de Koala sur les inerties des moteurs sont valables. On notera toutefois que l'écart en consommation s'accentue lorsque l'on passe à un cycle d'usage réel, plus représentatif du comportement dynamique du véhicule.

En s'intéressant de façon plus précise aux écarts des états de charge de la batterie, nous avons pu observer la répartition suivante :

- 40 à 50 % de l'écart de SOC semble dû aux différences de **régimes de rotation des moteurs** calculés par VEHLIB simplifié. Nous avons observé cela en imposant le régime moteur à celui de Koala et en regardant l'effet sur la consommation et le SOC. Ces différences de régime sont le fait des méthodes de calcul différentes entre Koala et VEHLIB : « backward » et « forward ».
- 40 % environ de l'écart de SOC semble du au **décalage de courant batterie** dans le modèle VEHLIB simplifie. En effet, le modèle de batterie purement ohmique nécessite un bloc simulink « memory ». Ce bloc décale le courant d'un pas de calcul (ici, une seconde) et aussi la tension batterie. Il s'en suit une différence de SOC.
- Le reste (10 à 20 %) est probablement du aux différences dans les **méthodes numériques** de résulutions des équations, ou bien au différences d'arrondis.

Par exemple, pour cycle Hyzem Urbain en boucle ouverte, en imposant les régimes de rotation des moteurs, on garde une consommation identique (4,4353 L/100 km pour 4,4353 L/100 km) et l'écart de SOC passe de -111 à -65 As. Ensuite, si en plus on impose le courant batterie aux valeurs de Koala, on garde exactement la même consommation et on passe de -65 As à 5As.

Modèle hybride parallèle à deux embrayages :

Le modèle simplifié de VEHLIB est semblable à celui à 1 embrayage. Seul un embrayage simplifié vient s'ajouter entre le moteur thermique et le moteur électrique.

Les écarts en suivi de cycle et en consommation de carburant sont du même ordre de grandeur tandis que les écarts en état de charge batterie sont plus élevés. Ce dernier point provient de la plus forte utilisation de la batterie dans les modèles à deux embrayage. En effet, le chemin optimum a tendance a plus utiliser la batterie, même si cela reste toujours faible.

Le tableau 3 donne un exemple de résultats obtenus.

Tableau 3 – Consommations sous VEHLIB simplifié et Koala.
Cycle NEDC en boucle ouverte
Modèle à deux embrayages

Cycles	***Koala***		***VEHLIB***	
NEDC	3,32 L/100 km	0,00 As	3,30 L/100km	-392 As

En imposant les régimes de rotations des moteurs, on passe de -392 As à -199 As. Puis, si on impose en plus le courant de la batterie, on tombe à -27,2 As. Cette différence tient à la méthode d'intégration du courant pour le calcul de la capacité batterie.

Conclusion :

Un premier travail de validation de Koala et de ses interactions avec VEHLIB a été effectué. Les résultats sont encourageants. Néanmoins, la partie la plus importante reste à accomplir. Il s'agit de se rapprocher à chaque fois un peu plus du modèle VEHLIB complexe, de mesurer les écarts de gain de consommation, et de les interpréter.

Un des points importants sera l'intégration du modèle plus complexe d'embrayage et de la discontinuité de couple au changement de rapports.

En parallèle, et c'est tout le travail de la thèse de Julien SCORDIA, il s'agira d'interpréter la stratégie utilisée par Koala pour la gestion de l'énergie et de la transcrire en stratégie « en ligne » dans le calculateur du modèle VEHLIB, afin de reproduire le plus fidèlement possible les répartitions de couple générées par Koala.

Annexe K

Émissions de polluants réglementés lors de l'essai à rapports optimisés lissés de la 306 HDI au banc à rouleau

émissions en g/km	urbain lissé	urbain cond. moyen	routier lissé	routier cond. moyen	autoroutier lissé	autoroutier cond.moyen
CO	0.08	0.635	0.037	0.173	0.021	0.031
NO_x	0.930	10.34	0.773	0.886	1.125	1.145
HC	0.019	0.053	0.010	0.022	0.05	0.06

FIG. K.1: *Émissions de polluants sur le banc à rouleau*

On constate que les émissions de polluants réglementés sont également réduites. C'est sur le cycle urbain que l'effet est le plus sensible, car les rapports de boîte optimisés sont très différents de ceux choisis par un conducteur moyen.

Annexe L

Types de graphe et problèmes les plus fréquents

Voici quelques problèmes qui peuvent se poser en théorie des graphes. Entre parenthèses les méthodes et théorèmes correspondants, sous forme de prise de notes. Ceci constitue un résumé de lecture de [Eug70].

- ▷ recherche du plus court chemin dans un graphe quelconque. (Ford, Bellman-Kalaba, basés sur le principe d'optimalité de Bellman) (années 50, Rand corporation, programmation dynamique [Cul03b, Cul03a]) ;
- ▷ maximisation de flot dans un réseau de transport (algorithme et théorème de Ford-Fulkerson) ;
- ▷ problèmes de couplage (théorème de König et König-Hall) ;
- ▷ recherche de chemin hamiltonien (méthode de Kaufmann via la multiplication latine, décomposition de Foulkes en graphes fortement connexes, théorème de König) ;
- ▷ recherche de circuit hamiltonien (théorème de Dirac). Problème du voyageur de commerce (utilisation de la programmation linéaire en nombres entiers), mais problème NP-complet [Lou02] : pas d'algorithme de complexité en $O(n^k)$ qui puisse le résoudre dans tous les cas (même si on ne peut prouver qu'il n'en existe pas) ;
- ▷ problème de connexion de longueur minimale entre les n sommets d'un arbre (algorithme de Kruskal). Décomposition d'un graphe connexe en système fondamental de cycles indépendants via un arbre partiel (e.g. pour trouver les mailles indépendantes d'un circuit électrique) ;
- ▷ recherche d'une chaîne ou d'un cycle (concept non orienté), ou circuit (concept orienté) eulérien dans un graphe (algorithme de Fleury) ;
- ▷ graphes planaires (formule d'Euler, théorème de Kuratowski) : application au problème du coloriage de cartes de géographie. Introduction de la notion de dualité.

Autres notions :

- ▷ notion de p-graphe (multigraphe d'ordre p) ;
- ▷ nombres caractéristiques d'un graphe (cyclomatique, etc.) ;
- ▷ centre, rayon, et point périphérique d'un graphe (notion d'écartement). Divers théorèmes subséquents ;
- ▷ réseau (graphe fortement connexe, sans boucle, de plus d'un sommet). Piste d'un point à un autre d'un réseau, diamètre d'un réseau ;
- ▷ matrice associée à un multigraphe. Notion de matrice complémentaire. Une matrice est dite booléenne dans le cas d'un 1-graphe. On définit alors des opérations spéciales sur les matrices

booléennes ;

- ▷ matrice d'incidence aux arcs (concept orienté) ou aux arêtes (concept non orienté) ;
- ▷ ensembles d'articulation, nombre de connexité (théorème de Whitney) ;
- ▷ implantation d'un graphe dans un autre.

Annexe M

Égalisateur de charge pour batteries

L'idée, telle que présentée par Valeo Electrical Systems dans son architecture « 12+12 » [CSP04], est de mettre en série des batteries de 12V afin de profiter d'une plus forte tension pour le fonctionnement de l'alterno-démarreur en moteur. Lors de l'utilisation en alternateur, et parce que les accessoires sont dimensionnés pour le 14V, les deux batteries sont mises en parallèle, ce qui permet de plus d'égaliser les forces électromotrices des batteries, et donc leur état de charge, via un circuit électronique élémentaire représenté sur la figure M.1 (cas de la mise en série ou parallèle de trois batteries).

Lors de l'utilisation en série, les interrupteurs I_1 et I_2 sont fermés. La mise en parallèle des batteries ne doit être effectuée qu'en ayant l'assurance que I_1 et I_2 soient ouverts (nécessité d'un temps mort). La procédure consiste alors à fermer I'_1 et I'_2, les interrupteurs I'_3 et I'_4 étant commandés afin de réguler les courants i_1 et i_2 (et donc i_3 car $i_1 + i_2 + i_3 = 0$), ce qui revient à réguler la vitesse d'égalisation d'état de charge entre les batteries. D'ailleurs les courants régulés correspondants peuvent être faibles, ce qui permet de dimensionner des interrupteurs de taille réduite (ceci semble le cas pour le système 14+X de Valeo [CSP04], puisque la recharge/décharge des supercapacités s'effectue à travers un convertisseur DC/DC réversible de 700W). Si les interrupteurs I'_3 et I'_4 étaient fermés en permanence, et en supposant la batterie numéro i assimilable à une force électromotrice E_i en série avec une résistance R_i, on aurait par exemple :

$$i_1 = \frac{-(R_2 + R_3) \cdot E_1 + R_2 \cdot E_3 + R_3 \cdot E_2}{\sum_{i>j} R_i \cdot R_j}$$

Et les autres courants par permutation circulaire.

La vitesse de montée des courant i_1 et i_3 lors de la fermeture des interrupteurs I'_3 et I'_4 dépend de l'inductance équivalente aux batteries et des inductances parasites dans le circuit. Si celles-ci sont trop faibles, les courants peuvent monter trop vite pour les boucles de régulation de i_1 et i_3 (somme des temps de mesure, régulation, et ouverture des interrupteurs prohibitif en comparaison des $\frac{L}{R}$ du circuit).

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11

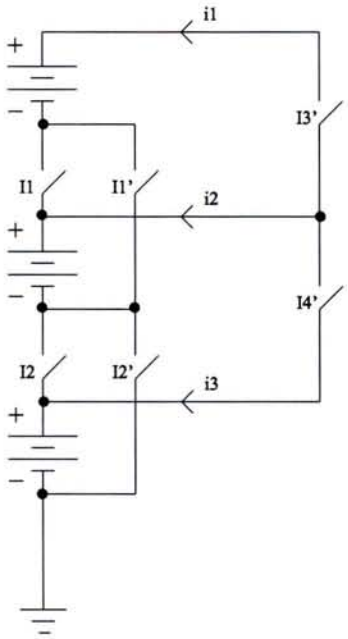


FIG. M.1: *Circuit égaliseur de charge pour trois batteries identiques*

Annexe N

Analyse des résultats instantanés de KOALA

Nous présentons ci-dessous l'analyse des résultats d'optimisation de KOALA, en ce qui concerne le respect ou non des conditions 0 et 0' (cf §11.4 p.129), pour le véhicule Clio 1.5l dCi downsizé avec moteur électrique Valeo Mars, sur le cycle NEDC.

À chaque point du cycle (valeur de vitesse et de couple à la roue) sont associés un ensemble de triplets (courant batterie, nombre d'occurrences total, nombre d'occurrences ne respectant pas la condition 0). Il peut être observé que :

- ▷ d'une part, le non-respect de la condition 0 reste relativement sporadique ;
- ▷ d'autre part, pour une valeur de couple et de vitesse à la roue, la valeur de courant batterie donnée par l'optimisation globale est le plus souvent unique (au maximum deux valeurs sont possibles). Ceci montre le respect quasi-permanent de la condition 0', sans même avoir besoin de considérer l'état de charge courant. Si de plus on considère l'état de charge courant, on vérifie le respect de la condition 0'.

```
----------------
vitesse roue (rad/s)=0.00
couple roue (Nm)=0.00
occurrences =
     3.99000
   242.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=3.31
couple roue (Nm)=366.37
occurrences =
   67.31000
    4.00000
    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=6.95
couple roue (Nm)=358.12
occurrences =
   3.99000
   4.00000
   0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=10.57
couple roue (Nm)=359.08
occurrences =
```

```
  3.99000
  4.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=14.28
couple roue (Nm)=369.30
occurrences =
  3.99000
  4.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=14.67
couple roue (Nm)=27.71
occurrences =
  22.30000  22.31000
   9.00000   4.00000
   5.00000   0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=14.67
couple roue (Nm)=27.69
occurrences =
  22.30000
  37.00000
   0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=12.56
couple roue (Nm)=-193.18
occurrences =
  -36.07000
    4.00000
    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=10.13
couple roue (Nm)=-198.09
occurrences =
  -30.69000
    4.00000
    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=7.20
couple roue (Nm)=-255.51
occurrences =
  -30.64000
    4.00000
    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=4.13
couple roue (Nm)=-257.35
occurrences =
  -15.55000
    4.00000
    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=1.12
couple roue (Nm)=-253.55
occurrences =
  3.99000
  4.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=0.05
couple roue (Nm)=-11.52
occurrences =
   3.99000
  11.00000
   0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=0.00
```

```
couple roue (Nm)=-0.46
occurrences =
   3.99000
  11.00000
   0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=0.00
couple roue (Nm)=-0.02
occurrences =
   3.99000
  11.00000
   0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=2.61
couple roue (Nm)=294.30
occurrences =
  46.65000
   9.00000
   0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=5.55
couple roue (Nm)=294.85
occurrences =
  78.57000   3.99000
   3.00000   6.00000
   0.00000   6.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=8.49
couple roue (Nm)=295.54
occurrences =
  3.99000
  9.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=11.43
couple roue (Nm)=296.38
occurrences =
  3.99000
  9.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=14.36
couple roue (Nm)=297.39
occurrences =
  3.99000
  9.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=17.65
couple roue (Nm)=334.65
occurrences =
  3.99000
  4.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=20.98
couple roue (Nm)=336.19
occurrences =
  3.99000
  4.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=24.31
couple roue (Nm)=337.93
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
```

```
----------------
vitesse roue (rad/s)=27.64
couple roue (Nm)=339.86
occurrences =
  3.99000
  4.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=30.97
couple roue (Nm)=341.99
occurrences =
  3.99000
  4.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=31.32
couple roue (Nm)=36.57
occurrences =
  52.06000
   4.00000
   0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=31.32
couple roue (Nm)=36.55
occurrences =
  52.04000
  92.00000
   0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=29.00
couple roue (Nm)=-209.86
occurrences =
  -104.73000
     4.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=26.35
couple roue (Nm)=-209.13
occurrences =
  -94.02000
    4.00000
    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=23.71
couple roue (Nm)=-210.48
occurrences =
  -85.20000
    4.00000
    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=21.00
couple roue (Nm)=-220.14
occurrences =
  -80.27000
    4.00000
    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=18.27
couple roue (Nm)=-222.17
occurrences =
  -68.02000
    4.00000
    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=15.59
couple roue (Nm)=-215.19
occurrences =
  -54.50000
```

```
    4.00000
    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=12.95
couple roue (Nm)=-215.53
occurrences =
  -43.02000
    4.00000
    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=10.24
couple roue (Nm)=-224.63
occurrences =
  -35.23000
    4.00000
    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=7.21
couple roue (Nm)=-257.81
occurrences =
  -31
    4
    0
----------------
vitesse roue (rad/s)=4.13
couple roue (Nm)=-257.50
occurrences =
  -15.57000
    4.00000
    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=1.12
couple roue (Nm)=-253.56
occurrences =
  3.99000
  4.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=16.60
couple roue (Nm)=226.29
occurrences =
  3.99000
  5.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=18.75
couple roue (Nm)=227.23
occurrences =
  3.99000
  5.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=21.00
couple roue (Nm)=237.28
occurrences =
  3.99000
  5.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=23.16
couple roue (Nm)=229.40
occurrences =
  3.99000
  5.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=25.32
couple roue (Nm)=230.59
```

```
occurrences =
  3.99000
  5.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=27.47
couple roue (Nm)=231.86
occurrences =
  3.99000
  5.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=29.71
couple roue (Nm)=242.26
occurrences =
  3.99000
  5.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=31.88
couple roue (Nm)=234.72
occurrences =
  3.99000
  5.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=34.03
couple roue (Nm)=236.25
occurrences =
  3.99000
  5.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=34.26
couple roue (Nm)=38.65
occurrences =
  59.11000
   5.00000
   0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=34.26
couple roue (Nm)=38.64
occurrences =
  59.10000
   5.00000
   0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=35.92
couple roue (Nm)=210.68
occurrences =
  3.99000
  5.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=37.78
couple roue (Nm)=212.15
occurrences =
  3.99000
  5.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=39.56
couple roue (Nm)=204.61
occurrences =
  3.99000
  5.00000
  0.00000
----------------
```

```
vitesse roue (rad/s)=41.41
couple roue (Nm)=215.16
occurrences =
  3.99000
  5.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=43.27
couple roue (Nm)=216.81
occurrences =
  3.99000
  5.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=45.04
couple roue (Nm)=209.44
occurrences =
  3.99000
  5.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=46.89
couple roue (Nm)=220.18
occurrences =
  3.99000
  5.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=48.75
couple roue (Nm)=222.01
occurrences =
  3.99000
  5.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=48.94
couple roue (Nm)=51.46
occurrences =
   3.99000
  10.00000
   0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=48.94
couple roue (Nm)=51.45
occurrences =
    3.99000
  108.00000
    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=47.27
couple roue (Nm)=-120.97
occurrences =
   -97.90000  -100.69000
     1.00000     3.00000
     0.00000     3.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=45.41
couple roue (Nm)=-122.77
occurrences =
  -97.90000  -96.27000
    1.00000    3.00000
    0.00000    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=43.63
couple roue (Nm)=-115.43
occurrences =
  -88.31000  -85.88000
    1.00000    3.00000
```

```
    0.00000    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=41.78
couple roue (Nm)=-126.07
occurrences =
  -91.51000  -92.30000
    1.00000    3.00000
    0.00000    3.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=39.92
couple roue (Nm)=-127.68
occurrences =
  -88.31000  -88.02000
    1.00000    3.00000
    0.00000    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=38.15
couple roue (Nm)=-120.16
occurrences =
  -78.71000  -79.24000
    1.00000    3.00000
    0.00000    3.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=36.30
couple roue (Nm)=-130.62
occurrences =
  -81.91000  -83.73000
    1.00000    3.00000
    0.00000    3.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=34.44
couple roue (Nm)=-132.04
occurrences =
  -78.71000  -78.54000
    1.00000    3.00000
    0.00000    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=34.26
couple roue (Nm)=38.62
occurrences =
  59.07000
   4.00000
   0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=34.26
couple roue (Nm)=38.63
occurrences =
  59.09000  59.08000
  44.00000   4.00000
   0.00000   4.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=32.93
couple roue (Nm)=-97.17
occurrences =
  -53.13000  -54.22000
    1.00000    3.00000
    0.00000    3.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=31.46
couple roue (Nm)=-98.20
occurrences =
  -49.93000  -49.64000
    1.00000    3.00000
    0.00000    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=28.82
couple roue (Nm)=-235.64
occurrences =
```

```
  -117.09000  -116.85000
     1.00000     3.00000
     0.00000     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=25.75
couple roue (Nm)=-252.74
occurrences =
  -110.69000  -112.32000
     1.00000     3.00000
     0.00000     3.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=22.69
couple roue (Nm)=-247.56
occurrences =
  -97.90000  -97.96000
    1.00000    3.00000
    0.00000    3.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=19.60
couple roue (Nm)=-256.81
occurrences =
  -81.91000  -81.94000
    1.00000    3.00000
    0.00000    3.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=16.53
couple roue (Nm)=-250.65
occurrences =
  -65.92000  -64.01000
    1.00000    3.00000
    0.00000    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=13.44
couple roue (Nm)=-259.50
occurrences =
  -53.13000  -52.73000
    1.00000    3.00000
    0.00000    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=10.37
couple roue (Nm)=-252.99
occurrences =
  -37.14000  -36.67000
    1.00000    3.00000
    0.00000    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=7.22
couple roue (Nm)=-260.39
occurrences =
  -31.40000
    3.00000
    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=4.13
couple roue (Nm)=-257.68
occurrences =
  -15.59000
    3.00000
    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=1.12
couple roue (Nm)=-253.58
occurrences =
  3.99000
  3.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=24.31
```

```
couple roue (Nm)=337.94
occurrences =
  3.99000
  3.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=7.34
couple roue (Nm)=-245.32
occurrences =
  -27.55000
    1.00000
    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=4.49
couple roue (Nm)=-233.39
occurrences =
  -11.56000
    1.00000
    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=1.62
couple roue (Nm)=-240.79
occurrences =
  1.11000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=0.22
couple roue (Nm)=-48.93
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=0.01
couple roue (Nm)=-1.97
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=0.00
couple roue (Nm)=-0.08
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=50.26
couple roue (Nm)=187.58
occurrences =
  3.99000
  2.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=51.81
couple roue (Nm)=198.20
occurrences =
  3.99000
  2.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=53.29
couple roue (Nm)=190.80
occurrences =
  3.99000
  2.00000
  0.00000
```

```
----------------
vitesse roue (rad/s)=54.85
couple roue (Nm)=201.49
occurrences =
  3.99000
  2.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=56.33
couple roue (Nm)=194.18
occurrences =
  3.99000
  2.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=57.79
couple roue (Nm)=195.87
occurrences =
  3.99000
  2.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=59.35
couple roue (Nm)=206.68
occurrences =
  3.99000
  2.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=60.83
couple roue (Nm)=199.49
occurrences =
  3.99000
  2.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=62.30
couple roue (Nm)=201.30
occurrences =
  3.99000
  2.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=63.85
couple roue (Nm)=212.25
occurrences =
  3.99000
  2.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=65.33
couple roue (Nm)=205.18
occurrences =
  3.99000
  2.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=66.88
couple roue (Nm)=216.21
occurrences =
  3.99000
  2.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=68.36
couple roue (Nm)=209.22
occurrences =
  3.99000
```

```
  2.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=68.51
couple roue (Nm)=74.68
occurrences =
  3.99000
  2.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=68.51
couple roue (Nm)=74.67
occurrences =
   3.99000
  98.00000
   0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=66.31
couple roue (Nm)=-152.90
occurrences =
  -161.86000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=63.87
couple roue (Nm)=-156.10
occurrences =
  -161.86000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=61.42
couple roue (Nm)=-159.19
occurrences =
  -161.86000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=58.97
couple roue (Nm)=-162.17
occurrences =
  -161.86000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=56.53
couple roue (Nm)=-164.44
occurrences =
  -155.47000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=54.09
couple roue (Nm)=-166.97
occurrences =
  -152.27000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=51.65
couple roue (Nm)=-169.63
occurrences =
  -149.07000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=49.21
couple roue (Nm)=-172.19
```

```
occurrences =
  -142.67000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=48.94
couple roue (Nm)=51.43
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=69.30
couple roue (Nm)=156.59
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=70.10
couple roue (Nm)=148.72
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=70.97
couple roue (Nm)=158.91
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=71.76
couple roue (Nm)=151.06
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=72.63
couple roue (Nm)=161.28
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=73.42
couple roue (Nm)=153.46
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=74.29
couple roue (Nm)=163.70
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=75.17
couple roue (Nm)=165.01
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
```

```
vitesse roue (rad/s)=75.97
couple roue (Nm)=157.21
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=76.84
couple roue (Nm)=167.50
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=77.63
couple roue (Nm)=159.73
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=78.50
couple roue (Nm)=170.05
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=79.29
couple roue (Nm)=162.30
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=80.16
couple roue (Nm)=172.64
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=81.04
couple roue (Nm)=174.04
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=81.84
couple roue (Nm)=166.34
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=82.71
couple roue (Nm)=176.71
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=83.50
couple roue (Nm)=169.03
occurrences =
  3.99000
  1.00000
```

```
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=84.37
couple roue (Nm)=179.44
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=85.16
couple roue (Nm)=171.78
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=86.03
couple roue (Nm)=182.22
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=86.91
couple roue (Nm)=183.71
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=87.70
couple roue (Nm)=176.09
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=88.58
couple roue (Nm)=186.56
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=89.37
couple roue (Nm)=178.96
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=90.24
couple roue (Nm)=189.46
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=91.03
couple roue (Nm)=181.89
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=91.90
couple roue (Nm)=192.42
occurrences =
```

```
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=92.78
couple roue (Nm)=194.00
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=93.57
couple roue (Nm)=186.47
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=94.44
couple roue (Nm)=197.03
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=95.23
couple roue (Nm)=189.52
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=96.11
couple roue (Nm)=200.12
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=96.90
couple roue (Nm)=192.63
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=97.77
couple roue (Nm)=203.25
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=97.86
couple roue (Nm)=122.63
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=97.86
couple roue (Nm)=122.62
occurrences =
   3.99000
  29.00000
   0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=98.74
```

```
couple roue (Nm)=214.07
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=99.71
couple roue (Nm)=215.96
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=100.69
couple roue (Nm)=217.86
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=101.67
couple roue (Nm)=219.78
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=102.65
couple roue (Nm)=221.71
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=103.62
couple roue (Nm)=223.67
occurrences =
  -137.01000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=104.60
couple roue (Nm)=225.64
occurrences =
  -134.13000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=105.58
couple roue (Nm)=227.62
occurrences =
  -131.37000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=106.56
couple roue (Nm)=229.63
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=107.53
couple roue (Nm)=231.65
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
```

```
----------------
vitesse roue (rad/s)=108.51
couple roue (Nm)=233.69
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=109.49
couple roue (Nm)=235.75
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=110.47
couple roue (Nm)=237.83
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=111.45
couple roue (Nm)=239.92
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=112.42
couple roue (Nm)=242.03
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=113.40
couple roue (Nm)=244.16
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=114.38
couple roue (Nm)=246.30
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=115.36
couple roue (Nm)=248.47
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=116.33
couple roue (Nm)=250.65
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=117.31
couple roue (Nm)=252.84
occurrences =
  3.99000
```

```
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=117.41
couple roue (Nm)=163.33
occurrences =
  3.99000
  3.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=117.41
couple roue (Nm)=163.32
occurrences =
  3.99000
  7.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=115.22
couple roue (Nm)=-65.98
occurrences =
  -129.88000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=112.77
couple roue (Nm)=-71.37
occurrences =
  -139.48000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=110.33
couple roue (Nm)=-76.64
occurrences =
  -145.87000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=107.89
couple roue (Nm)=-81.81
occurrences =
  -152.27000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=105.44
couple roue (Nm)=-86.87
occurrences =
  -155.47000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=103.00
couple roue (Nm)=-91.81
occurrences =
  -158.66000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=100.55
couple roue (Nm)=-96.65
occurrences =
  -161.86000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=98.11
couple roue (Nm)=-101.38
```

```
occurrences =
  -165.06000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=95.66
couple roue (Nm)=-106.00
occurrences =
  -165.06000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=93.22
couple roue (Nm)=-110.51
occurrences =
  -161.86000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=90.77
couple roue (Nm)=-114.91
occurrences =
  -158.66000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=88.33
couple roue (Nm)=-119.20
occurrences =
  -161.86000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=85.88
couple roue (Nm)=-123.38
occurrences =
  -165.06000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=83.44
couple roue (Nm)=-127.46
occurrences =
  -171.45000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=80.99
couple roue (Nm)=-131.42
occurrences =
  -174.65000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=78.54
couple roue (Nm)=-135.28
occurrences =
  -171.45000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=75.22
couple roue (Nm)=-247.67
occurrences =
  -193.84000
     1.00000
     0.00000
----------------
```

```
vitesse roue (rad/s)=71.61
couple roue (Nm)=-251.90
occurrences =
  -184.25000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=68.01
couple roue (Nm)=-256.91
occurrences =
  -177.85000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=64.34
couple roue (Nm)=-270.05
occurrences =
  -168.26000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=60.64
couple roue (Nm)=-275.48
occurrences =
  -174.65000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=57.00
couple roue (Nm)=-271.76
occurrences =
  -171.45000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=53.39
couple roue (Nm)=-275.22
occurrences =
  -161.86000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=49.72
couple roue (Nm)=-287.34
occurrences =
  -161.86000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=45.28
couple roue (Nm)=-391.00
occurrences =
  -187.44000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=40.43
couple roue (Nm)=-403.81
occurrences =
  -190.64000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=35.55
couple roue (Nm)=-408.62
occurrences =
  -168.26000
     1.00000
```

```
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=30.67
couple roue (Nm)=-412.35
occurrences =
  -152.27000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=25.79
couple roue (Nm)=-415.60
occurrences =
  -136.28000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=20.90
couple roue (Nm)=-418.41
occurrences =
  -142.67000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=16.01
couple roue (Nm)=-420.78
occurrences =
  -107.50000
     1.00000
     0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=11.12
couple roue (Nm)=-422.71
occurrences =
  -75.52000
    1.00000
    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=6.27
couple roue (Nm)=-403.80
occurrences =
  -33.94000
    1.00000
    0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=1.70
couple roue (Nm)=-393.99
occurrences =
  -1.96000
   1.00000
   0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=0.08
couple roue (Nm)=-19.03
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=0.00
couple roue (Nm)=-0.77
occurrences =
  3.99000
  1.00000
  0.00000
----------------
vitesse roue (rad/s)=0.00
couple roue (Nm)=-0.03
occurrences =
```

```
3.99000
1.00000
0.00000
```

Annexe O

Classification bayesienne

Le calcul de probabilités quantifie l'incertitude vis-à-vis d'un événement. Deux conceptions s'opposent :

- ▷ l'OBJECTIVISTE, qui stipule que la probabilité d'un événement peut être déterminée *de manière unique*. C'est le cas quand le cardinal de l'univers est fini, auquel cas le calcul de probabilité se réduit à un problème de *dénombrement*. Le PARADOXE DE BERTRAND [Sap90] montre que ce n'est plus le cas quand l'univers n'est plus dénombrable, suivant la manière de considérer le problème (et donc suivant l'observateur). La vision FRÉQUENTISTE tente alors de résoudre le problème en faisant usage de la loi des grands nombres, c'est-à-dire que la probabilité d'un événement peut être vue comme la fréquence du nombre de réalisations de l'événement quand le nombre d'essais tend vers l'infini. Deux critiques peuvent alors être formulées. D'une part, dans la pratique il est impossible de pratiquer un nombre infini d'essais. D'autre part, définir la probabilité en partant de la loi des grands nombres, qui elle-même est un théorème des probabilités et donc suppose défini le concept de probabilité, relève du cercle pernicieux ;
- ▷ la SUBJECTIVISTE, ou A PRIORISTE qui stipule que la probabilité d'un événement n'existe pas, et n'est donc pas mesurable. On parle alors plutôt de mesure d'INCERTITUDE, pouvant varier selon l'observateur et les circonstances, donc *subjective*. L'école néo-bayesienne (Thomas Bayes 1702-1761) propose de probabiliser l'incertitude, en donnant à chaque cause possible C_k d'un événement E une probabilité $P(C_k)$, chaque cause C_k entraînant E avec une certaine probabilité $P(E/C_k)$. Cela revient à considérer $P(E/C_k))$ comme la réalisation d'une variable aléatoire π à valeurs dans $[0;1]$ avec une certaine densité de probabilité (discrète ou continue) connue. C'est alors que l'on peut faire usage de la deuxième formule de Bayes, encore appelée « théorème sur la probabilité des causes », qui se déduit via :
  - ◇ le concept de probabilité conditionnelle défini à partir de l'axiomatique de Kolgomorov ;
  - ◇ le théorème des probabilités totales qui découle directement de l'axiomatique de Kolgomorov ;

  L'événement E étant supposé réalisé, on obtiendra alors la probabilité que la cause C_k possible pour E soit la bonne :

$$P(C_k/E) = \frac{P(E/C_k) \cdot P(C_k)}{\sum_i P(E/C_i) \cdot P(C_i)} \tag{O.1}$$

  Tous les termes au numérateur et dénominateur sont connus. Notons que le numérateur correspond à la probabilité de l'événement $E \cap C_k$, qui nous est donc également accessible, mais qui généralement n'est pas d'un grand intérêt.

La démarche de Bayes est notamment employée dans les RÉSEAUX BAYESIENS [MR04], qui sont des graphes acycliques orientés permettant de modéliser des influences complexes entre un grand nombre de variables aléatoires, et de calculer les probabilités des causes associées. Certains outils de filtrage de courrier indésirable (« spam ») modernes utilisent d'ailleurs les réseaux bayesiens. Les probabilités nécessaires à la discrimination sont alors calculées via une démarche fréquentiste.

Elle est aussi appliquée en analyse discriminante. Dans ce cas, l'événement E de la formule O.1 correspond à l'observation d'un vecteur x, tandis que la cause C_k correspond à l'appartenance de x à une classe C_k, $k \in [1;n]$. La problématique est de connaître la classe d'appartenance du vecteur d'observation x, c'est-à-dire $P(C_k/x)$:

◇ $P(C_k)$ correspond à la proportion de la classe C_k dans la population totale ;

◇ $P(x/C_k)$ représente la probabilité que x soit réalisé pour la classe C_k considérée. Si la distribution de probabilité du vecteur d'observation x est donnée pour chaque groupe $k \in [1;n]$ par une densité $f_k(x)$, alors $P(x/C_k) = f_k(x)$.

On obtient donc :

$$P(C_k/x) = \frac{f_k(x) \cdot P(C_k)}{\sum_i f_i(x) \cdot P(C_i)}$$

Dans ce cas, la règle bayesienne consiste à affecter le vecteur d'observation x au groupe qui a la probabilité $P(C_k/x)$ maximale. Les dénominateurs des $P(C_k/x)$ étant identiques, le problème revient à trouver le $k \in [1;n]$ qui maximise le numérateur $f_k(x) \cdot P(C_k)$:

◇ $f_k(x)$ peut être évalué en tenant compte d'un critère de distance par rapport à un vecteur y_{k_i} dont on sait qu'il appartient à un groupe $k \in [1;n]$ donné ;

◇ $P(C_k)$ est déterminé par comptage des vecteurs y_{k_i}.

Annexe P

Publications

[BDRT+04] et [BTJS02] abordent le problème du véhicule hybride de manière assez générale (critères de choix lors de la conception, panel de solutions possibles).

[TSDR+04] aborde la procédure de dimensionnement et d'évaluation du potentiel des différentes architectures. Cela résume donc la procédure employée lors de l'étude PARAVH [DRST+04].

[JTM+04] décrit la procédure de mise en oeuvre du banc dynamique du LTE, c'est-à-dire les diverses étapes par ordre de complexité, jusqu'à l'architecture parallèle deux embrayages.

Par ailleurs :

- ▷ un article concernant l'outil KOALA a été accepté pour publication dans l'International Journal of Vehicle Design [SDRT+] ;
- ▷ un papier a été accepté pour la conférence IEEE Vehicular Power and Propulsion d'octobre 2004, concernant la démarche de l'étude paramétrique PARAVH, et ses résultats [SDRT04].

S.C.D. - U.H.P. NANCY
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES

Bibliographie

[Acaa] Académie de Nantes. Le dioxyde de soufre ou SO2.

[Acab] Académie de Nantes. Les pluies acides, le smog.

[ADF00] D. Assanis, G. Delagrammatikas, and R. Fellini. An optimization approach to hybrid electric propulsion System Design. *Jounal of Mechanics of Structures and Machines*, June 2000.

[AKK+00] Kaoru Aoki, Shigetaka Kuroda, Shigemasa Kajiwara, Hiromitsu Sato, and Yoshio Yamamoto. Development of Integrated Motor Assist Hybrid System : Development of the "Insight", a Personal Hybrid Coupe. In *SAE Technical Paper Series*, June 2000.

[ALH+03] J. André, S. Lacour, M. Hugot, Z. Olah, and R. Joumard. Impact of the gearshift strategy on emission measurements. Technical report, INRETS LTE, March 2003.

[And97] M. André. Driving pattern analysis and driving cycles - European Development of Hybrid Technology approaching Zero Emission Mobility (HYZEM). Technical Report 9709, INRETS LEN, 1997.

[And02] Michel André. The artemis european driving cycles for measuring car pollutant emissions. 7th international symposium, highway and urban pollution. In *The science of the total environment. Special issue*, 2002.

[ATS99] Kimura Akihiro, Abe Tetsuya, and Sasaki Shoichi. Drive force control of a parallel-series hybrid system. *JSAE Review*, (20) :337–341, 1999.

[BBJ+96] N. Bonnard, M.T. Brondeau, D. Jargot, T. Clavel, M. Falcy, A. Hesbert, J.C. Protois, and O. Schneider. Fiche toxicologique n°41 : dioxyde de soufre, 1996.

[BCR98] Stéphane Barbusse, Denis Clodic, and Jean-Pierre Roumégoux. Climatisation automobile, énergie et environnement. *Recherche Transports Sécurité*, July 1998.

[BD95] Michael R. Berthold and Jay Diamond. Boosting the performance of RBF networks with dynamic decay adjustment. *Advances in neural information*, 1995.

[BDRT+04] François Badin, Matthieu Desbois-Renaudin, Rochdi Trigui, Bruno Jeanneret, Bertrand Malaquin, and Julien Scordia. Véhicules hybrides, quels choix pour quels gains en émission de gaz à effet de serre. In *Alternatives énergétiques dans l'automobile*, April 2004.

[BDTR+90] P. Borne, G. Dauphin-Tanguy, J.P. Richard, F. Rotella, and I. Zambettakis. *Commande et optimisation des processus.* Technip, 1990.

[Ber98] J. Beretta. New Classification on Electric-Thermal Hybrid Vehicles. In *EVS 15*, 1998.

[BJHT00] François Badin, Bruno Jeanneret, Fabien Harel, and Rochdi Trigui. Véhicules Hybrides. In *Propr'Elec, La Rochelle*, September 2000.

[BJTH01] F. Badin, B. Jeanneret, R. Trigui, and F. Harel. Hybrid Vehicles, should we plug them to the grid or not ? In *The 18th international Electric Vehicle Symposium*, October 2001.

[BM99] Bernadette Bouchon-Meunier. *La logique floue*, volume Que sais-je ? 2702. Presses Universitaires de France, 3ième edition, 1999.

[BNMB94] C.E. Barbier, B. Nogarede, H. Meyer, and S. Bensaoud. A battery state of charge indicator for electric vehicle. Technical report, Laboratoire MIRGAS, 1994.

[Bos00] Bosch. *Mémento de Technologie Automobile.* 2ième edition, 2000.

[Bou02] Paul Boucharel. Optimisation de l'efficacité d'une chaîne de traction automobile. In *3ème congrès des doctorants de l'Ecole Doctorale SYSTEMES du LAAS*, 2002.

[BP03] Joseph Beretta and Denis Porcelatto. Is the future of traction batteries will be the future of EV ? In *EVS20*, 2003.

[Bri02] Olivier Briat. *Contribution à la conception et à l'intégration d'un accumulateur cinétique d'énergie dans une plate-forme de test pour véhicules électriques à source hybride.* PhD thesis, Université Bordeaux 1 / Laboratoire IXL UMR CNRS 5818, November 2002.

[BTJS02] F. Badin, R. Trigui, B. Jeanneret, and J. Scordia. Les véhicules routiers à traction électrique ou hybride. In *Colloque Transport Terrestre Électrique*, 25 April 2002.

[BV96] François Blayo and Michel Verleysen. *Les réseaux de neurones artificiels*, volume Que sais-je ? 3042. Presses Universitaires de France, 1ère edition, 1996.

[CB03] D. Cot Bruno. La clim' propre, 11 December 2003.

[col02] collectif. *Catalogue de la revue Automobile 2002.* March 2002.

[CS99] Jean-Paul Curtay and Thierry Souccar. *Le programme de longue vie.* Éditions du Seuil, 1999.

[CSP04] K. Cogo, D. Schulte, and C. Plasse. Belt Driven Starter Alternator Reversible Systems, from stop-start to Mild Hybrid. In *Alternatives Énergétiques dans l'Automobile*, April 2004.

[Cul94] J.-C. Culioli. *Introduction à l'optimisation.* Ellipses, 1994.

[Cul03a] J.-C. Culioli. Élaborer une stratégie en partant de la fin. *La Recherche*, September 2003.

[Cul03b] J.-C. Culioli. "La programmation dynamique" (complément à la rubrique WXYZ). *La Recherche*, August 2003.

[Del02] Sébastien Delprat. *Évaluation des stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèles.* PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2002.

[Del04] Delphi. Delphi's Energen 42 V Belt Alternator Starter Helps Improve Fuel Economy and Lower Engine Emissions, 2004.

[DG97] M. Dorigo and L.M. Gambardella. Ant Colony System : a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1997.

[Dou01] André Douaud. Quelles énergies pour l'automobile de demain ? *Ingénieurs de l'automobile*, June 2001.

[DRB04] Matthieu Desbois-Renaudin and François Badin. Les véhicules hybrides, une alternative viable aux véhicules classiques. In *Énergie électrique : besoins, enjeux, technologies et applications*, 18 June 2004.

[DRST+04] Matthieu Desbois-Renaudin, Julien Scordia, Rochdi Trigui, François Badin, Bruno Jeanneret, Cédric Plasse, and Jean-François Sarrau. Véhicules hybrides thermique-électriques. Étude paramétrique de l'architecture hybride parallèle. Technical Report 0405, INRETS-LTE, September 2004.

[Dub02] Alexandra Dubray. *Adaptation des lois de gestion d'énergie des véhicules hybrides suivant le profil de mission suivi.* PhD thesis, Institut Polytechnique de Grenoble, 2002.

[Dum02] Tony Dumont. Caractérisation et détermination des pertes d'une transmission à variation continue dans le cadre d'une modélisation de la Nissan Tino Hybride. Master's thesis, Écoles des Mines d'Albi-Carmaux, 2002.

[EEC90] EEC Directive 90/C81/01, 30 March 90.

[Enc04] Encyclopédie Microsoft Encarta en ligne. "atmosphérique, pollution", 2004.

[Eug70] Jacques Eugène. *Théorie des graphes*, chapter A 158. Techniques de l'Ingénieur, 1970.

[FFB00a] C. Forgez, G. Friedrich, and J.M. Biedinger. Method to find the hybridization rate for a parallel hybrid electrical vehicle. In *Electric Vehicle Symposium 17*, October 2000.

[FFB00b] C. Forgez, G. Friedrich, and J.M. Biedinger. Système flou de supervision des modes de fonctionnement d'un véhicule hybride électrique parallèle. In *2050*, 2000.

[Fra03] R. Frank. The balance of power. *Automotive Engineering International*, October 2003.

[GAPDMDS04] Gwenael Guyonvarch, Christophe Aloup, Christophe Petitjean, and Antoine De Monts De Savasse. Electric heating and air-conditioning. *aei*, May 2004.

[Har00] Fabien Harel. Rapport d'évaluation du véhicule Volkswagen Polo Stop & Go équipé par Valeo. Technical Report 2022, INRETS LTE, 2000.

[HEV04a] Ford big vows 'nothing but full hybrids'. *Hybrid & Electric Vehicle Progress*, 1 May 2004.

[HEV04b] Mitsubishi takes a different tack for hybrid systems and markets. *Hybrid & Electric Vehicle Progress*, 1 May 2004.

[HEV04c] U.K. hybrid project focuses on low-cost improvements to diesel van's fuel economy. *Hybrid & Electric Vehicle Progress*, 15 March 2004.

[HMC99] Ltd. Honda Motor Co. Insight : press information, September 1999.

[IMTA00] Eiji Inada, Isaya Matsuo, Masahiko Tahara, and Tatsuo Abe. Development of a High-Performance Hybrid Electric Vehicle "Tino Hybrid". In *Electric Vehicle Symposium 17*, 2000.

[Jal04] C. Jallet. Autotech : la technique automobile, 2004.

[JH99] Bruno Jeanneret and Fabien Harel. Rapport d'évaluation du véhicule Toyota Prius. Technical report, INRETS LTE, September 1999.

[Jou02] Robert Joumard. Les enjeux de la pollution de l'air et des transports. *5ième colloque C-VELEC*, June 2002.

[JTM+04] B. Jeanneret, R. Trigui, B. Malaquin, M. Desbois-Renaudin, F. Badin, C. Plasse, and J. Scordia. Mise en oeuvre d'une commande temps réel de transmission hybride sur banc d'essai moteur. In *Alternatives Énergétiques dans l'Automobile*, April 2004.

[Kah04] Hans Kahlen. Board net for road vehicles with two or more voltages - a way to soft hybrid vehicles. In *ELE-Drive Transportation*, March 2004.

[Lou02] Kyle Loudon. *Maîtrise des algorithmes en C*. O'Reilly, 2002.

[Min04] Ministère de l'environnement de l'Ontario. Dioxyde d'azote (NO2), 2004.

[Mis] Mission Interministérielle de l'Effet de Serre.

[MLK01] F. Mueller, P. Lueck, and S. Koehle. Hybrid Electric Vehicles - Discussion of Different Configurations. *Powertrain International*, 2001.

[MR04] Jean-Michel Marin and Fabrice Rossi. Découvrez les réseaux bayésiens. *Linux Magazine*, April 2004.

[MSIS01] Kenji Morita, Kazuki Shimamura, Nobuo Iwai, and Ken-ichi Shimizu. Fuel economy and exhaust emissions test procedure for hybrid electric vehicles - comparison of continuous repeating mode, linear approximation and SAE J1711. In *Electric Vehicle Symposium 18*, 2001.

[MV03] V. Morel and F. Vangraefschepe. Analyse du véhicule hybride Honda Insight. Technical Report 57184, Institut Français du Pétrole, January 2003.

[NF191] Norme NF ISO 1176 : Véhicules routiers - Masses - Vocabulaire et codes, October 1991.

[NF196] Norme NF EN 1821-1 : Véhicules routiers à propulsion électrique. Mesurage des capacités routières. Partie 1 : Véhicules électriques purs., December 1996.

[NF198] Norme NF EN 1986-1 : Véhicules routiers à propulsion électrique. Mesurage des performances énergétiques. Partie 1 : Véhicules électriques purs., January 1998.

[NF199] Norme NF EN 1821-2 : Véhicules routiers à propulsion électriques. Mesurage des capacités routières. Partie 2 : Véhicules hybrides électriques thermiques., August 1999.

[NF101a] Norme NF EN 13444-1 : Véhicules routiers à propulsion électrique. Mesurage des émissions des véhicules hybrides. Partie 1 : Véhicules hybrides électriques thermiques., October 2001.

[NF101b] Norme NF EN 13447 : Véhicules routiers à propulsion électrique. Terminologie, October 2001.

[NF101c] Norme NF EN 1986-2 : Véhicules routiers à propulsion électriques. Mesurage des performances énergétiques. Partie 2 : Véhicules Hybrides Electriques Thermiques, October 2001.

[Pag99] Gino Paganelli. *Conception et commande d'une chaîne de traction pour véhicule hybride parallèle thermique et électrique*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 1999.

[PCLDvW01] C. Plasse, M. Chemin, G. Lacamoire, and E. Dr von Westerholt. L'alterno-démarreur, du Stop & Go au groupe motopropulseur hybride. *Société des Ingénieurs Automobiles*, November 2001.

[PEB+01] Gino Paganelli, Gabriele Ercole, Avra Brahma, Yann Guezennec, and Giorgio Rizzoni. General supervisory control policy for the energy optimization of charge-sustaining hybrid electric vehicles. *JSAE Review*, April 2001.

[Pon00] Gérard Pons. Traction électrique et véhicules hybrides. Étude d'un élévateur de tension. Master's thesis, Conservatoire national des arts et métiers, 2000.

[Raj02] Pierre-Yves Rajotte. Le smog photochimique, 2002.

[RCN+03] N. Raman, G. Chagnon, K. Nechev, A. Romero, T. Sack, and M. Saft. Saft High Power Li-Ion Automotive Battery Technology. In *EVS20*, 2003.

[RDC99] S. Rimaux, M. Delhom, and E. Combes. Hybrid Vehicle Powertrain : Modelling and Control. In *EVS 16*, 1999.

[RDL+79] J.P. Roumégoux, J. Delsey, J. Lambert, J.P. Bac, and C. Fouilloux. Consommation d'énergie par la circulation routière. Technical report, Institut de Recherche des Transports, May 1979.

[Rei99] Wolfgang Reik. Electrical motor in the drive train. Technical report, LuK GmbH & Co., Bühl, 1999.

[Ros04] Fabrice Rossi. Découvrez les algorithmes évolutionnaires. *Linux Magazine*, January 2004.

[Sap90] Gilbert Saporta. *Probabilités, analyse des données et statistiques.* Éditions Technip, 1990.

[Sco02] Julien Scordia. Véhicule hybride parallèle à addition de couple débrayable : problème du dimensionnement et perspectives futures pour la stratégie de gestion de la chaîne de traction. Technical Report 324, INRETS-LTE, September 2002.

[SDRT+] Julien Scordia, Matthieu Desbois-Renaudin, Rochdi Trigui, Bruno Jeanneret, and François Badin. Global optimization of energy management laws in hybrid vehicles using graph theory. *International Journal of Vehicle Design.*

[SDRT04] Julien Scordia, Matthieu Desbois-Renaudin, and Rochdi Trigui. Hybrid powertrain sizing and potential consumption gains. In *IEEE Vehicular Power and Propulsion*, 2004.

[SDW00] Richard Smokers, Arjan Dijkhuizen, and Rob Winkel. Worldwide developments and activities in the field of hybrid road-vehicle technology. Technical report, International Energy Agency, 2000.

[SMSW02] G. Simopoulos, J. MacBain, E. Schneider, and E. Wingeier. Improving SUV fuel economy. *aei*, July 2002.

[SSSO02] M. Soga, M. Shimada, J-I. Sakamoto, and A. Otomo. Hybrid vehicle dynamics. *aei*, July 2002.

[TJB04] Rochdi Trigui, Bruno Jeanneret, and François Badin. Modélisation systémique de véhicules hybrides en vue de la prédiction de leurs performances énergétiques et dynamiques. Contruction de la bibliothèque de modèles VEHLIB. *Recherche Transports Sécurité*, 83, 2004.

[Toy04] Toyota Europe. La Toyota Prius GT rejoint le "Goodwood Festival of Speed", June 2004.

[Tri97] Rochdi Trigui. *Motorisation asynchrone pour véhicules électriques. Modélisation, optimisation et évaluation.* PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, June 1997.

[TSDR+04] Rochdi Trigui, Julien Scordia, Matthieu Desbois-Renaudin, Bruno Jeanneret, and François Badin. Global forward-backward approach for a systematic analysis and implementation of hybrid vehicle management laws. Application on a single shaft parallel hybrid power train. In *ELE-Drive Transportation*, March 2004.

[VdT00] E. Van den Tillaart. *MATADOR : Management tool for the assessment of driveline technologies and research*, chapter SubTask 2.4 : Test Methods. SOC correction methods for HEVs. TNO Automotive, July 2000.

[Ven01] Nathalie Méaude Venot. *Modélisation et commande de groupes moto-propulseurs à basse consommation : exemple de problèmes d'automatique des sytèmes hybrides.* PhD thesis, Université Paris IX Dauphine, 2001.

[Vin98] Gérard Vinsard. Optimisation. Technical report, ENSEM, 1998.

[Vis04] Visteon. How can we create a powerful and efficient stop/start system that can be easily incorporated into a manufacturer existing powertrain ?, 2004.

[VV04] Alfredo Vaccaro and Domenico Villaci. Prototyping of a Fuzzy based Energy Manager for Parallel Hybrid Electric Vehicles. In *ELE-Drive Transportation*, March 2004.

[WCZ01] Aihua Wang, Yaobin Chen, and Rongjun Zhang. A novel design of energy management system for hybrid electric vehicles using evolutionary computation. In *Electric Vehicle Symposium 18*, 2001.

[ZCC03] Yuan Zhu, Yaobin Chen, and Quanshi Chen. Analysis and design of an optimal energy management and control system for hybrid electric vehicles. In *EVS 19*, 2003.

[Zwi98] Gerhard Zwietnig. À la pointe de la technologie ? Technical report, Datel GmbH, December 1998.

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique