



HAL
open science

Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybride paralleles

Sebastien Delprat

► **To cite this version:**

Sebastien Delprat. Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybride paralleles. Automatique / Robotique. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2002. Français. <NNT : >. <tel-00007966>

HAL Id: tel-00007966

<https://theses.hal.science/tel-00007966v1>

Submitted on 7 Jan 2005

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.



HAL Authorization

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ DE VALENCIENNES
ET DU HAINAUT-CAMBRESIS

pour obtenir le grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITÉ

spécialité

Automatique

par

Sébastien DELPRAT

Evaluation de stratégies de commande
pour véhicules hybrides parallèles

Soutenue publiquement le 04 janvier 2002 devant la commission d'examen :

MM.	Pierre	BORNE	Professeur à l'École Centrale de Lille	(rapporteur)
	Mehrdad	EHSANI	Professeur à l'Université de Texas A&M	
	Thierry Marie	GUERRA	Professeur à l'Université de Valenciennes	(directeur)
	Pascal	LEVEL	Professeur à l'Université de Valenciennes	
	Nacer	M 'SIRDI	Professeur à l'Université de Versailles	(rapporteur)
	Gabriel	PLASSAT	ADEME	
Mme.	Jannette	RIMAUX	PSA Peugeot Citroën	

En essayant continuellement on finit par réussir.

Donc : plus ça rate, plus on a de chance que cela marche....

Devise Shadok.

Remerciements

En 1998, j'ai débarqué sur une planète étrange, la planète SF (*Systèmes Flous*). Les premières semaines ont été dures, il a fallu acquérir le vocabulaire et la grammaire de base. L'essentiel des communications usuelles est composé de maxims répétées une bonne quinzaine de fois par jour : 'Zut j'ai un LAG', 'Vas-y Switche', 'c'est pas un p'tit peu trop fort pour toi', 'Je suis speed, c'est normal, je ne mange que des légumes', 'Domiiiiiiiiiqueeeee', 'WAAAAZAAAAA', 'Ben qui dit, Bon qui fait, et l'endemain, y'éton mort', 'lance-lui un mouton explosif', 'Chef, j'ai péte un hacheur', 'Compile ton kernel', 'Bon les garçons, vous me promettez de ne pas vous moquer'.

Cet étrange monde est peuplé de créatures passant le plus clair de leur temps à faire ce qui est dénommé la 'recherche'.... Les côtoyer permet généralement d'avancer à grands pas mais nécessite également d'acquérir un certain sens de l'humour, légèrement décalé...

'Le TMG', *i.e.* 'Le Chef' : Son humour n'a d'égal que sa personnalité hors du commun (résultant probablement du croisement d'un ours avec P. Desproges). Il est *évident*, que c'est de lui que j'ai le plus appris, et je l'en remercie. Je tiens cependant à mettre en garde le lecteur. Tout dialogue nécessite une formulation adaptée, sans quoi la créature se replie sur elle-même et émet d'un grognement sourd la cinglante réponse : 'Fais une phrase' ou bien 'c'est quoi l'entrée, c'est quoi la sortie?'. Cet individu entre régulièrement en transe et se met alors à écrire frénétiquement des formules mathématiques sur un tableau. Gare à celui qui osera en effacer ne serait ce qu'une bribe. En cas d'attaque, plongez-le dans l'eau et équipez-le d'une paire de lunettes, il devient alors terriblement vulnérable et tout danger sera rapidement écarté....

La deuxième créature est plus réservée. D'une manière générale, le 'Gino commun', alias Electric Man, ne s'intéresse qu'à ce qui est mu, au minimum, par un moteur électrique. On ne le rencontre que dans des garages, sous une montagne de fils électrique ou sous un châssis de véhicule hybride. Il passe le plus clair de son temps à chercher comment faire rouler un véhicule grâce à une source d'énergie réversible. Parmi ses nombreuses réalisations, je retiendrai le véhicule hybride du LAMIH. Je le remercie de m'avoir fait partager sa passion pour les véhicules hybrides.

‘Le Jimmy’ est généralement plus tranquille et se distingue par un sens de la répartie assez aiguisé. Attention, il est probablement contaminé au L_AT^EX. Généralement, il est accompagné d’une Séverine et d’un Petit Nico. Je vous remercie tous pour toutes les soirées bien sympathiques qui nous ont permis de nous changer les idées...

‘Le François’ se remarque surtout par ses affiches, à l’humour toujours décalé, placardées un peu partout. Attention si le François est généralement assez discret, il n’en reste pas moins imprévisible. Il peut parfois devenir extrêmement bruyant. Il commence alors par pousser un grand cri : ‘AAHHHHHHHHH’ afin d’ameuter toutes les créatures de la salle 211 et conclut par une histoire abracadabrantesque, généralement incomprise de ses congénères.

✧ Parmi les habitants de cette planète, ‘L’Hélène’ est sûrement la plus délicate. Elle est généralement entourée d’objets familiers et est dotée d’un sens de l’esthétique et de la délicatesse qui échappe (tout au moins en apparence) aux autres membres de l’équipe. Je la remercie donc d’avoir apporté ses quelques grammes de finesse dans ce monde de ‘brutes’, (si j’ose dire...). ✧

‘Le Jean-Jacques’ vit sur une planète voisine, la planète Mécano, et rend régulièrement visite aux habitants de la planète SF. Un grand merci pour toutes les explications que tu m’as données sur la partie mécanique du prototype.

‘Le Yann’ est une créature très spéciale (identifiée comme Linuxien) qui passe le plus clair de son temps à configurer des logos qui tournent, des fenêtres transparentes, des Kernels version X3.b2@ sur des machines récupérées, désossés et remontés. D’ici quelques années, il parlera le binaire couramment. Les mots ‘Microsoft’, ‘Windows’ peuvent le rendre fou, et l’amènent à prononcer un discours interminable sur la supériorité et la bienfaisance de son gourou (un certain Linus Torwalds).

‘Le Carlos’ est de loin le plus subtil. Son humour au cinquième degré, son rire hors norme en font un personnage à part. Bien qu’il se fasse de plus en plus rare sur la planète SF, je le remercie pour tous les bons moments et les franches parties de rigolades que l’on a vécus.

Je tiens également à remercier l’ensemble des êtres qui peuplent ou passent sur la planète SF et à proximité : Dominiiiiiiiiqueeeee sur le point de devenir un GassoManiac, Mathieu, Rémy, Charles, Laurent, Olivier, Gabriel, Jo, les Biomecs, sans oublier R. Capelle et les autres...

Je remercie également les gens de PSA Peugeot Citroën : E. Combes, L. Chapelon, S. Rimaux et plus particulièrement Jeannette Rimaux pour sa gentillesse et sa disponibilité.

Enfin, je tiens à remercier ma femme d’une part de m’avoir supporté pendant toute la durée de la rédaction du mémoire et d’autre part pour toute l’aide qu’elle m’a apporté (logistique, morale, ...).

Table des matières

Remerciements	1
Table des matières	1
Introduction générale	1
Références personnelles	5
Chapitre 1. Véhicules hybrides	7
1.1. Introduction	8
1.2. Composants utilisés dans les véhicules hybrides	8
1.3. Principales architectures de véhicules hybrides	10
1.3.1. Architecture série	10
1.3.2. Architecture parallèle	11
1.3.3. Principaux modes de fonctionnement	13
1.4. Le prototype réalisé au LAMIH	17
1.4.1. Modélisation /Paganelli 1999/	17
1.4.2. Architecture et dimensionnement des composants /Paganelli 1999/	20
1.4.3. Relations mécaniques	22
1.5. Conclusion	23
Chapitre 2. Stratégies de commande	25
2.1. Introduction : problématique générale	26
2.2. Stratégies de commande à base de règles	28
2.2.1. Fuzzy Torque Distribution Control /Won & Langari 2001/	28
2.2.2. Stratégie floue basée sur le rendement /N. Salman & al. 2000/	29
2.2.3. Stratégie de commande floue : Fuzzy Control Strategy (FCS) /Advisor 2001/	31
2.2.3.1. Principe	31
2.2.3.2. Résultats	35
2.3. Stratégies de commande basées sur une minimisation instantanée	37
2.3.1. Stratégie de Minimisation des pertes (LMS) /Seiler & Schröder 1998/	37
2.3.1.1. Principe	37
2.3.1.2. Gestion de l'état de charge	42
2.3.2. Consommation équivalente (ECMS) /Paganelli & al. 2000/	44
2.3.2.1. Consommation équivalente totale	45
2.3.2.2. Prise en compte de l'état de charge	48
2.3.3. Real Time Control Strategy (RTCS) /Johnson & al 2001/	50
2.4. Conclusion	50
Chapitre 3. Optimisation globale	53
3.1. Introduction	54

3.2. Formulation du problème d'optimisation	54
3.3. Optimisation basée sur l'algorithme du recuit simulé	56
3.3.1. Obtention d'une solution initiale	58
3.3.2. Perturbation d'une solution	59
3.3.3. Prise en compte de la contrainte égalité	59
3.3.4. Loi d'évolution de la température	60
3.3.5. Résultats	61
3.3.6. Conclusion	63
3.4. Programmation dynamique	64
3.4.1. Principe	64
3.4.2. Conclusion	66
3.5. Algorithme d'optimisation basé sur la théorie de la commande optimale	66
3.5.1. Algorithme de base /Delprat & al. 2001/	67
3.5.1.1. Résolution du problème réduit	69
3.5.1.2. Problème complet	74
3.5.1.3. Influence de $\lambda(0)$	76
3.5.1.4. Limitations de l'algorithme	80
3.5.1.5. Résultats	81
3.5.1.5.1. Modèle simplifié	81
3.5.1.5.2. Modèle complet	83
3.5.2. Améliorations de l'algorithme de base	84
3.5.2.1. Intégration du rendement de la batterie dans le problème d'optimisation /Delprat & al. 2001/	84
3.5.2.1.1. Formulation du problème	85
3.5.2.1.2. Résolution du problème d'optimisation globale	87
3.5.2.1.3. Algorithme	90
3.5.2.1.4. Résultats (sur le modèle complet)	91
3.5.2.2. Intégration de l'état du moteur thermique dans l'algorithme d'optimisation globale	93
3.6. Conclusion	98
Chapitre 4. Stratégies de commande temps réel : propositions, évaluations, validations	99
4.1. Introduction	100
4.2. Estimation de l'état de charge	100
4.2.1. Méthodes basées sur l'intégrale du courant	101
4.2.2. Approche courant-tension	102
4.3. Propositions de stratégies de commande temps réel	106
-control	107
4.3.2. Commande par gestion du moteur thermique	108
4.3.2.1. Analyse des résultats obtenus avec l'algorithme d'optimisation globale	109
4.3.2.2. Stratégie de commande basée sur la gestion de l'état du moteur thermique	110
4.4. Evaluation des stratégies	113
4.4.1. Principe	113
4.4.2. Choix des cycles de vitesse	115
4.4.3. Evaluations des stratégies de commande	120
4.5. Évaluation de différentes architectures	122
4.5.1. Groupes motopropulseurs testés	123
4.5.2. Résultats obtenus	124
4.5.2.1. Architecture simple arbre	124
4.5.2.2. Architecture double arbre	126

4.5.3. Critère synthétique de performance	128
4.6. Conclusion	129
Conclusion générale	131
Glossaire	133
Bibliographie	135
Annexes	141
Annexe A : Formulation du problème d'optimisation pour l'architecture parallèle double arbre	143
Annexe B : Résultats obtenus pour différents prototypes parallèle simple et double arbre	147
B.1. Prototypes parallèle Simple arbre	147
B.1.1. Cycle Urbain Fluide 2	147
B.1. 2 Cycle Routier n°3	148
B.1. 3 . Cycle Autoroutier n°1	149
B.2. Architecture double arbre	150
B.2.1. Cycle Urbain Fluide n°2	150
B.2.2. Cycle Routier n°3	151
B.2.3. Cycle Autoroutier n°1	152
Liste des figures	153

Introduction générale

Le nombre de véhicules en circulation ne cesse d'augmenter, et même si les nouveaux moteurs thermiques sont de moins en moins polluants, les problèmes de pollution sont de plus en plus critiques, particulièrement pour les gaz à effet de serre responsables du réchauffement de la planète /CCFA 2001/. Un moyen de lutter contre ces émissions est de mettre en place des normes de plus en plus restrictives pour les véhicules neufs.

Les limites imposées par les normes seront, à plus ou moins long terme, malgré les avancées technologiques, trop restrictives pour être respectées par les moteurs thermiques. Une conséquence est la nécessité de prévoir de nouvelles technologies qui permettront de rendre les véhicules bien moins polluants.

Les véhicules électriques sont apparus, dans un premier temps, comme une solution prometteuse. Leur faible autonomie combinée à un coût trop élevé ne leur a pas permis d'être concurrentiels vis-à-vis de leur homologue conventionnel.

Une autre solution semble aujourd'hui voir le jour : les véhicules hybrides. Les premiers ont été commercialisés ces dernières années, Toyota Prius, Honda Insight, Nissan Tino. De nombreux démonstrateurs ont également vu le jour, Dynactive PSA /Combes 2000/, Kangoo Renault /Moretti 1999/. L'ajout d'un ou plusieurs moteurs électriques au véhicule conventionnel introduit des degrés de liberté supplémentaires dans la commande du groupe motopropulseur qui peuvent être mis à profit pour réduire non seulement les émissions de polluants mais aussi la consommation de carburant. L'expérience du véhicule électrique ayant servi de leçon, l'introduction de véhicules hybrides sur le marché ne se fera que si les performances globales de ces véhicules (vitesse, autonomie, agrément, etc.) atteignent au minimum celles du véhicule conventionnel.

Une façon de réduire leur consommation de carburant est, comme pour les véhicules conventionnels, l'amélioration des différentes parties mécaniques du véhicule (allègement de la carrosserie, performances aérodynamiques, utilisation de nouvelles technologies pour le moteur thermique etc.), mais dans le cas du véhicule hybride, une gestion efficace des échanges énergétiques entre les différents composants (moteurs, batteries, etc.) permet

également de réduire significativement la consommation de carburant et les émissions de polluants.

Un véhicule hybride met en œuvre, par définition, au moins deux sources d'énergie pour assurer sa propulsion. Généralement, au moins deux moteurs (électrique et thermique) sont associés à des éléments de transmission mécanique pour assurer la traction du véhicule. L'agencement de ces organes définit l'architecture du véhicule. Il existe de nombreux agencements possibles. Ces différents points sont abordés dans le premier chapitre. Ces travaux font suite à la thèse de Gino Paganelli /Paganelli 1999/ qui a abouti à la réalisation d'un prototype de véhicule hybride en collaboration avec le groupe PSA Peugeot Citroën. Les caractéristiques de ce prototype sont également rappelées dans ce chapitre.

Parmi la problématique générale des véhicules hybrides, un point particulièrement critique est la répartition de puissance entre les différents organes de traction. Plusieurs algorithmes, appelés stratégies de commande, ont été proposés /Paganelli & al. 2000/ /Seiler & Schröder 1998/ /Won & Langari 2001/. L'objet du deuxième chapitre est la présentation d'algorithmes existants destinés à la commande de véhicules en temps réel. Ils sont regroupés en deux classes. La première classe correspond à des stratégies faisant appel à une expertise humaine et sont donc traitées avec les outils associés, par exemple des bases de règles utilisant le formalisme du flou. La deuxième classe met en œuvre une analyse plus détaillée des échanges énergétiques, il s'agit principalement de minimisation instantanée.

En simulation, il est possible d'envisager le problème des stratégies de commande comme un problème d'optimisation globale sous contraintes /Brahma & al. 2000/ /Delprat & al. 1999/ /Rimaux & al. 1999/ /Zhang & Chen 2001/. Les résultats, limités à la simulation, permettent, en premier lieu, de disposer de consommation de carburant de référence pour l'évaluation des stratégies de commande temps réel. En second lieu, le fait de disposer de résultats d'optimisation globale permet l'acquisition d'une expertise de ce qui serait une « bonne » stratégie de commande. Plusieurs algorithmes d'optimisation globale sont proposés, recuit simulé, programmation dynamique et enfin utilisation de la théorie de la commande optimale.

Le dernier chapitre est un retour vers la commande axée temps réel en utilisant le potentiel et l'expérience acquise lors du chapitre précédent. Deux nouvelles stratégies sont alors proposées puis comparées à d'autres stratégies sélectionnées parmi celles présentées au chapitre deux. Un ensemble de critères permettant l'évaluation des stratégies de commande sont proposés.

Références personnelles

Revues

G. Paganelli, T.M. Guerra, S. Delprat, J.J. Santin, M. Delhom, E. Combes, *Simulation and assessment of power control strategies for a parallel hybrid car*, Journal of automobile engineering, IMechE, SAE International IEE, n°214, p 705-718, 2000.

Congrès sur invitation

S. Delprat, T.M Guerra, J. Rimoux, *Optimal control of a parallel powertrain : From global optimization to real time control strategy*, IEEE Fall Vehicular Technology Conference, Atlantic City, (USA), Octobre 2001.

G. Paganelli, S. Delprat, T.M Guerra, J. Rimoux, J.J. Santin, *Equivalent Consumption Minimization Strategy for parallel Hybrid powertrains*, IEEE Fall Vehicular Technology Conference, Atlantic City, (USA), Octobre 2001.

Congrès Internationaux

S. Delprat, T.M. Guerra, G. Paganelli, J. Lauber, M. Delhom, *Control strategy optimization for an hybrid parallel powertrain*, ACC 2001, Waschington D.C, (USA), Juin 2001.

S. Delprat, T.M Guerra, J. Rimoux, *Optimal control of a parallel powertrain : From global optimization to real time control strategy*, Electric Vehicle Symposium, EVS18, Berlin, (Allemagne), Octobre 2001.

S. Delprat, T.M. Guerra, J. Lauber, G. Paganelli, S. Rimoux , E. Combes, *Optimal control theory applied to a parallel hybrid powertrain*, ISATA 2000 Automotive & transportation technology, p243-251, Dublin, (Irlande), Septembre 2000.

S. Delprat , G. Paganelli, TM. Guerra, J.J. Santin, M. Delhom, E. Combes, *Commande d'une chaîne de traction hybride parallèle simple arbre* CIFA 2000, Conférence Internationale Francophone d'Automatique, Lille, (France), 2000.

S. Delprat, G. Paganelli, T.M. Guerra, J.J. Santin, M. Delhom, E. Combes, *Algorithmic optimization tool for the evaluation of HEV control strategies*, Electric Vehicle Symposium, EVS16, Pékin, (Chine), Octobre 1999.

Congrès Nationaux

J.J. Santin, L Faure, S. Delprat, P. Level, P.A. Jouve, E. Combes, *Modélisation des vibrations de torsion dans le groupe motopulseur d'un véhicule hybride parallèle. Application à la conception d'un "embrayage" à roue-libre*, XVe Congrès Français de Mécanique, Nancy, (France), septembre 2001.

G. Paganelli, T.M. Guerra, S. Delprat, J.J. Santin, M. Delhom, E. Combes, *Conception, réalisation et commande d'un véhicule hybride parallèle prototype*, C-VELEC'99, 4^{ème} Colloque du club véhicule électrique de l'ENSIEG, Grenoble, (France), Novembre 1999.

Chapitre 1.

Véhicules hybrides

1.1. Introduction	8
1.2. Composants utilisés dans les véhicules hybrides	8
1.3. Principales architectures de véhicules hybrides	10
1.3.1. Architecture série	10
1.3.2. Architecture parallèle	11
1.3.3. Principaux modes de fonctionnement	13
1.4. Le prototype réalisé au LAMIH	17
1.4.1. Modélisation /Paganelli 1999/	17
1.4.2. Architecture et dimensionnement des composants /Paganelli 1999/	20
1.4.3. Relations mécaniques	22
1.5. Conclusion	23

1.1. Introduction

Ce chapitre présente succinctement les véhicules hybrides. Les composants couramment utilisés sont rappelés, ainsi que leurs différentes associations qui permettent de décrire les grandes classes d'architectures existantes : série, parallèle, combinée. Quelques exemples de véhicules actuellement commercialisés sont également donnés. Une attention particulière sera ensuite portée sur l'architecture dite parallèle, pour laquelle le point de jonction entre les deux motorisations se fait de manière mécanique. Un prototype utilisant ce type d'architecture a été réalisé au LAMIH dans le cadre du doctorat de Gino Paganelli /Paganelli 1999/. Comme ce prototype sera la base de plusieurs études au cours de ce mémoire, ses différents composants ainsi que les relations mécaniques décrivant l'architecture sont détaillées à la fin de ce chapitre.

1.2. Composants utilisés dans les véhicules hybrides

Ce paragraphe reprend de façon succincte les différents composants couramment utilisés. On retrouve évidemment les composants servant à stocker l'énergie, deux organes de traction de type différent (électrique et mécanique) ainsi que des éléments de transmission. Pour plus de détails sur ces derniers (équations fondamentales mises en œuvre, etc.), le lecteur pourra se référer à /Paganelli 1999/ /Van Mierlo & al. 2001/.

- Stockage de l'énergie

Les véhicules hybrides utilisent au moins une source d'énergie réversible. Pour stocker l'énergie, le composant le plus couramment utilisé est la batterie. Les batteries au plomb sont parmi les moins chères mais elles sont aussi les plus lourdes et peu performantes. D'autres technologies, ayant généralement un meilleur rendement et sont plus légères peuvent être utilisées, comme par exemple le Nickel Métal Hydrure, le Lithium Ion. Néanmoins, aujourd'hui, leur coût est plus élevé et leur gestion (température, cycles de charge décharge, estimation de l'état de charge) s'avère plus délicate /Kok & al. 2001/.

D'autres composants ont été envisagés pour le stockage de l'énergie : les supercapacités et les volants d'inertie mais leur usage reste relativement marginal /Mellor & al. 2000/. Il semble que l'association de batteries et de supercapacités soit une solution intéressante d'un point de vue technique mais relativement coûteuse à mettre en œuvre /Selzer & al. 2000/ /Arnet & Haines 2001/.

Souvent, pour des raisons évidentes de coût, les principaux composants et/ou technologies mis en œuvre dans les véhicules hybrides sont déjà utilisés dans l'automobile.

- Moteurs :

Toutes les technologies du moteur thermique sont envisageables. On peut citer, par exemple, les moteurs diesel, diester, essence, GPL ou bien encore au gaz naturel. Chacune de ces technologies a des caractéristiques différentes que ce soit en termes de pollution, de performance, de rendement, d'encombrement et de poids, ou de consommation. Les technologies les plus couramment utilisées pour les applications au véhicule hybride sont les moteurs diesel et essence.

Pour les moteurs électriques, toutes les technologies sont également envisageables : moteur à courant continu, synchrone ou asynchrone, etc. Une des caractéristiques essentielles des véhicules hybrides est le taux d'hybridisation, c'est à dire le rapport entre la puissance du moteur thermique et la puissance totale installée dans le véhicule /Beretta 1998/. Lorsque le taux d'hybridisation est proche de 1, le moteur électrique a une faible puissance, comme par exemple les alerno-démarrateurs /Melolor & al. 2000/ qui permettent de démarrer quasi instantanément le moteur thermique.

Lorsque le taux d'hybridisation est proche de 0.5 le ou les moteurs électrique participent à la propulsion du véhicule et/ou à la recharge des batteries. Généralement, les moteurs de traction sont intégrés dans le groupe motopropulseur, mais pour certaines applications, les moteurs-roues /Simard & Johnson 2000/ /Pusca & al. 2001/ sont situés dans le moyeu de chaque roue.

- Piles à combustible

Les piles à combustible produisent de l'électricité à partir d'hydrogène et leur fonctionnement est pratiquement zéro émission. Cependant, leur utilisation dans le domaine de l'automobile reste au stade du prototype et soulève de nombreux problèmes comme par exemple le stockage de l'hydrogène, ou l'encombrement des composants annexes (compresseurs, radiateurs, etc.). D'autre part, la distribution d'hydrogène à grande échelle nécessiterait une mise à jour complète du système de distribution de carburant actuel. Pour remédier à ce problème, des réformeurs embarqués permettraient de produire l'hydrogène à partir de carburants fossiles, (méthanol, éthanol) mais là encore de nombreux problèmes techniques sont à résoudre /Martin 2001/.

- Transmissions

Les transmissions mécaniques sont celles couramment utilisées dans les véhicules conventionnels : embrayage (utilisé pour accoupler/désaccoupler deux ensembles mécaniques), boîte de vitesses (manuelle ou automatique) ou variateur continu de vitesse, train planétaire (système mécanique à trois arbres dans lequel le régime de l'arbre de sortie est égal à la somme des régimes des arbres d'entrées), différents types de réducteurs (à courroie, chaîne ou engrenages), etc.

Les différentes façons d'associer ces composants permettent de définir plusieurs architectures de groupes motopropulseurs.

1.3. Principales architectures de véhicules hybrides

On distingue trois grandes familles d'architecture : série, parallèle et combinée. Une manière de différencier les deux premières est de considérer la nature du point de jonction entre les différentes chaînes de traction, appelé 'nœud'. Dans l'architecture 'Série', le nœud est électrique, dans l'architecture parallèle, il est mécanique.

1.3.1. Architecture série

Dans l'architecture série, figure 1, la propulsion est intégralement assurée par un moteur électrique. Ce dernier peut être alimenté par les batteries et/ou par le groupe électrogène. Ce type d'architecture est souvent utilisé dans les bus hybrides /Anderson & al. 1999/. Une utilisation « naturelle » de ce type d'architecture consiste à augmenter l'autonomie d'un véhicule électrique par l'ajout d'un groupe électrogène /Moretti 1999/. Cette architecture nécessite un moteur électrique relativement puissant car il assure à lui seul l'intégralité de la propulsion. Le taux d'hybridation est donc généralement élevé.

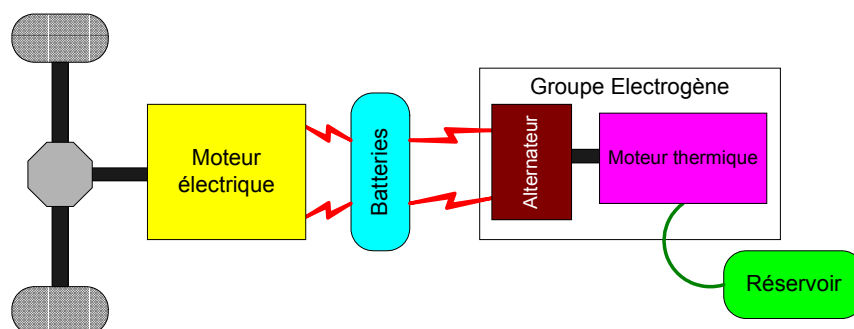


Figure 1 : L'architecture hybride série

Un des inconvénients majeur de ce type d'architecture est le faible rendement global de l'ensemble car la puissance mécanique délivrée par le moteur thermique est tout d'abord convertie en puissance électrique par l'alternateur, éventuellement stockée dans les batteries, puis reconvertie en puissance mécanique par le moteur électrique. Cependant, du point de vue de la commande, cette architecture offre deux degrés de liberté : le régime et le couple du moteur thermique peuvent être choisis quasiment indépendamment des conditions de conduite.

1.3.2. Architecture parallèle

Pour l'architecture parallèle, le point de jonction entre les différentes chaînes de traction est cette fois mécanique. Lorsque les différents moteurs sont solidaires du même arbre, figure 2, on parle d'architecture hybride parallèle simple arbre.

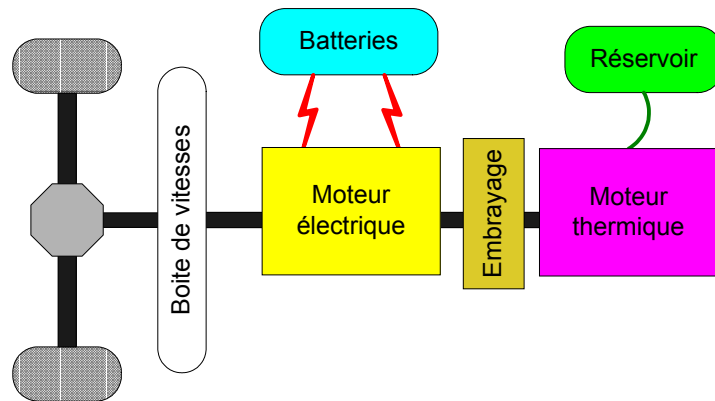


Figure 2: L'architecture hybride parallèle simple arbre

Lorsque le moteur électrique a une très faible puissance, on parle alors d'alternateur-démarrateur et celui-ci est placé avant l'embrayage /Sonnenburg & Hallen 2000/. Dans ce cas, la propulsion est quasi intégralement assurée par le moteur thermique et l'alternateur-démarrateur n'est utilisé que dans la phase de démarrage du moteur thermique. Le moteur thermique est arrêté dès que le véhicule est arrêté afin de réduire la consommation et les émissions de polluants. Lors des phases de démarrage, le moteur thermique pouvant être entraîné à régime beaucoup plus élevé qu'avec un démarreur classique, les émissions de polluants sont réduites de manière significative /Furubayashi & al. 2001/.

Lorsque les deux moteurs ont des puissances similaires, le moteur électrique est placé entre l'embrayage et la boîte de vitesses. Les régimes des deux moteurs sont linéairement dépendant du régime des roues. Il s'agit alors de répartir le couple aux roues nécessaire à la propulsion du véhicule entre les deux moteurs, en tenant compte des rapports de boîte. L'un

des inconvénients inhérent à cette architecture est la perte de couple aux roues apparaissant lors des changements de rapports, qui dégrade le confort de conduite.

Pour remédier à cet inconvénient, la boîte de vitesses peut être remplacée par un variateur continu de vitesse /Kleimaier & Schröder 2001/. Le moteur électrique peut également être connecté sur un arbre différent, on parle dans ce cas d'architecture double arbre, figure 3. On s'aperçoit que le dimensionnement des composants et la répartition de puissance sur les deux chaînes de traction sont moins contraints.

Dans l'architecture double arbre, les deux moteurs ont des régimes indépendants et à tout moment la traction du véhicule est assurée par un des deux moteurs.

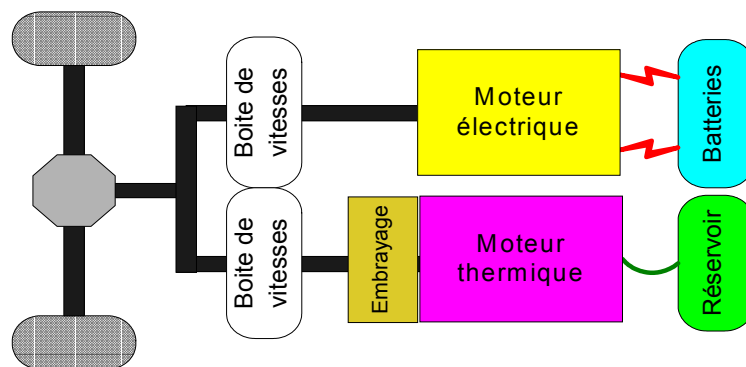


Figure 3 : l'architecture double arbre

Lorsque le moteur électrique est relié directement aux roues, pour assurer une réduction de consommation de carburant et des émissions de polluants significative, sa puissance doit être relativement importante. L'utilisation d'un moteur électrique de moindre puissance reste possible si une deuxième boîte de vitesses est ajoutée, figure 3. Cependant, pour des raisons de coût et de complexité mécanique cette dernière solution semble difficilement envisageable.

Dans les architectures simple et double arbre, le couple aux roues résulte de l'addition des couples fournis par les moteurs (aux rapports de réduction près). L'architecture combinée met en œuvre un train planétaire afin de réaliser une addition de vitesse, figure 4.

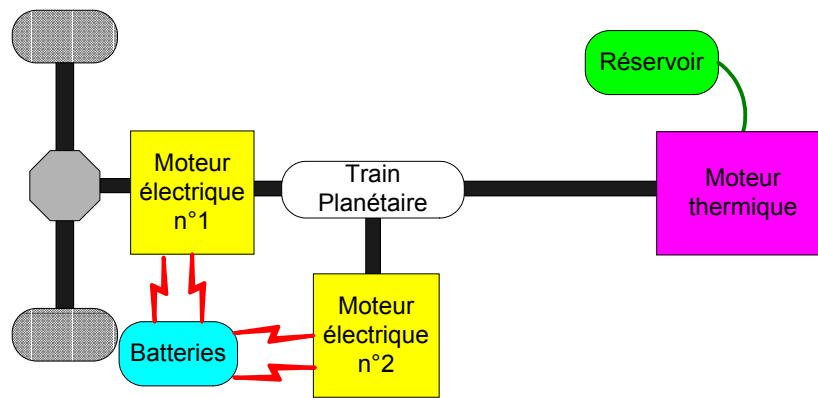


Figure 4: L'architecture hybride combinée

Si seulement un moteur thermique et un moteur électrique sont utilisés, le seul degré de liberté est le choix des régimes de chacun des moteurs. Par contre, si un deuxième moteur électrique est ajouté, figure 4, alors le couple et le régime du moteur thermique peuvent être choisis presque indépendamment des conditions de conduite (vitesse du véhicule, couple demandé aux roues par le conducteur) /Martellucci & al. 2001/.

Cette liste d'architectures est loin d'être exhaustive, mais représente les configurations les plus utilisées. D'autres ont été proposées mais elles sont généralement plus complexes (plusieurs embrayages, 3 moteurs électriques, etc.) /Tian & al. 2001/ /Stridsberg 2001/.

1.3.3. Principaux modes de fonctionnement

Les véhicules hybrides disposant de plusieurs sources d'énergie pour assurer leur propulsion, on distingue trois principaux modes de fonctionnement possibles, figure 5. D'une façon très générale, on peut les résumer de la manière suivante :

- le mode *thermique pur* correspond à une propulsion intégralement assurée par le moteur thermique. Les performances en termes de consommation et de pollution sont alors similaires à celles d'un véhicule conventionnel ;
- le mode *électrique pur* correspond à une propulsion intégralement assurée par le moteur électrique. Le véhicule est alors dit ZEV (Zero Emission Vehicle) et les performances en terme de dynamique et d'agrément de conduite sont similaires à celles d'un véhicule électrique. Ce mode conduit à plus ou moins long terme à la décharge des batteries ;

- le mode *hybride* correspond à une propulsion assurée par les deux moteurs simultanément. Plusieurs cas de figures sont envisageables, figure 5. En traction, l'énergie nécessaire à la propulsion du véhicule peut être délivrée soit par les deux moteurs, soit par le moteur thermique seul. Le moteur électrique est alors utilisé pour recharger les batteries en roulant. En freinage, le moteur électrique récupère une partie de l'énergie cinétique du véhicule ainsi qu'un supplément délivré par le moteur thermique.

Une fois l'architecture sélectionnée, le choix des technologies et le dimensionnement des composants sont essentiels car ils déterminent non seulement les performances dynamiques du véhicule (accélération maximale, vitesse maximale, etc.) mais aussi la consommation moyenne du véhicule et ses émissions de polluants. Généralement, ces choix sont des compromis entre performances dynamiques, consommation et émissions, et bien sur, coût de fabrication.

Cependant, tous ces choix ne peuvent être effectués uniquement au regard de critères purement techniques. Les attentes des consommateurs, les différentes utilisations possibles du véhicule hybride sont également des facteurs à prendre en compte dans la problématique générale des véhicules hybrides.

Mode électrique pur	Freinage du véhicule : $C_r(t) < 0$		<u>Freinage récupératif en mode électrique pur :</u> L'énergie cinétique du véhicule est récupérée par le moteur électrique pour recharger les batteries.
	Traction du véhicule : $C_r(t) \geq 0$		<u>Traction en mode électrique pur :</u> Le moteur électrique fournit l'intégralité de l'énergie nécessaire à la propulsion du véhicule.
Mode thermique pur	Traction du véhicule : $C_r(t) \geq 0$		<u>Traction en mode thermique pur :</u> Le moteur thermique fournit l'intégralité de l'énergie nécessaire à la propulsion du véhicule.
	Freinage du véhicule : $C_r(t) < 0$		<u>Freinage en mode thermique pur :</u> Le moteur thermique n'étant pas réversible, l'intégralité de l'énergie cinétique du véhicule est dissipée sous forme de chaleur dans les freins.
Mode Hybride	Traction du véhicule : $C_r(t) \geq 0$		<u>Traction du véhicule en mode hybride :</u> Les deux moteurs participent à la propulsion du véhicule.
	Traction du véhicule : $C_r(t) \geq 0$		<u>Traction du véhicule en mode hybride :</u> Le moteur thermique fournit l'intégralité de l'énergie nécessaire à la propulsion du véhicule ainsi qu'un supplément qui est récupéré par le moteur électrique afin de recharger les batteries.
	Freinage du véhicule : $C_r(t) < 0$		<u>Freinage récupératif en mode hybride :</u> L'énergie cinétique du véhicule et l'énergie produite par le moteur thermique sont récupérées par le moteur électrique afin de recharger les batteries.

Figure 5: Les différents modes de fonctionnement du véhicule hybride

Un des éléments qui détermine en partie l'utilisation possible du véhicule hybride est la capacité de la batterie car elle détermine l'autonomie du véhicule en mode électrique pur. Actuellement, le prix des batteries est relativement élevé et donc, dans l'immédiat, les premiers véhicules hybrides commercialisés (Toyota *Prius*, Nissan *Tino*, Honda *Insight*) ne disposent que d'une faible capacité de batterie ne permettant pas le fonctionnement en mode électrique pur /Badin & al. 2001/.

On peut émettre l'hypothèse que, plus tard, avec l'introduction en plus grande quantité de véhicules hybrides sur le marché, le prix des batteries diminuera et l'autonomie en mode électrique pur atteindra entre 30 et 60 km. Le véhicule hybride pourrait alors être utilisé en mode électrique pur pour assurer la plupart des petits trajets quotidiens. Les kilomètres effectués en mode électrique pur auront un prix de revient très faible (de l'ordre de 1.5 €/100km /AVERE 2001/) en comparaison à celui du carburant /Frank 2001/.

Dans ce contexte, le véhicule hybride cumule alors les avantages du véhicule électrique pour les courts trajets et ceux du véhicule conventionnel pour les trajets plus longs.

D'un point de vue technique, ce type d'utilisation est tout à fait envisageable, il peut permettre une réduction significative des émissions de polluants et diminuer le prix de revient au kilomètre. Cependant, une question que l'on peut se poser, est de savoir si les utilisateurs sont prêts à recharger la batterie tous les soirs ?

Sous certaines conditions, une réduction des performances dynamiques (accélération et vitesse maximale) du véhicule permet de réduire à la fois la consommation de carburant et les émissions de polluants. Il est alors envisageable de proposer à l'utilisateur, par exemple à travers un bouton sur le tableau de bord, un mode 'économique et moins polluant' dans lequel il accepte de dégrader volontairement les performances du véhicule.

Pour que ce mode de fonctionnement puisse être accepté par les utilisateurs, un compromis entre réduction des performances, de la consommation, et des émissions devra être trouvé.

Ces quelques questions posent le problème plus général de l'acceptation des nouvelles technologies et du changement des comportements. Il est clair que les réponses à ces questions auront un impact non négligeable sur les cahiers des charges des véhicules hybrides.

La dernière partie de ce chapitre est consacrée à la description d'un prototype réalisé au sein du laboratoire.

1.4. Le prototype réalisé au LAMIH

Dans le cadre de la coopération entre PSA Peugeot Citroën, le LAMIH, le Fond Européen pour le Développement Régional (FEDER) et l'Agence De l'Environnement et la Maîtrise de l'Energie (ADEME), un prototype de véhicule hybride a été conçu et réalisé lors de la thèse de Gino Paganelli /Paganelli 1999/. Le cahier des charges a été mis au point avec PSA Peugeot Citroën, il spécifie les performances en mode hybride mais aussi en mode électrique pur :

- Mode Hybride :

Vitesse de croisière (maintenue sur de longues distances sur le plat) : 140 km/h

Vitesse de pointe : 160km/h, sur 1000m.

Accélération : 0-100km/h en 14s

Tenue en côte : 4% 130 km/h sur dénivelé de 500m

12% 80 km/h

Ces performances correspondent sensiblement à celles d'une berline familiale.

- Mode électrique pur :

Vitesse de pointe : 90 km/h sur le plat

Autonomie : 35 km sur cycle UF3

Accélération : 0-50 km/h en 8 s.

Tenue en côte : 4% 60 km/h

12% 40 km/h

Démarrage en côte : 24% minimum.

Ce cahier des charges va, en fonction de l'architecture retenue, contraindre les différents choix des composants.

1.4.1. Modélisation /Paganelli 1999/

L'étape préalable à toute étude de ce type est la modélisation. Elle a été choisie modulaire, chaque organe étant modélisé séparément. Leur assemblage permet alors de simuler le comportement de différents véhicules : conventionnel, électrique, hybrides (série, parallèle et combiné).

L'ensemble a été mis sous forme d'une boîte à outils pour Matlab/Simulink. Les comportements énergétiques et dynamiques des différents composants mis en œuvre dans les véhicules hybrides ont été modélisés.

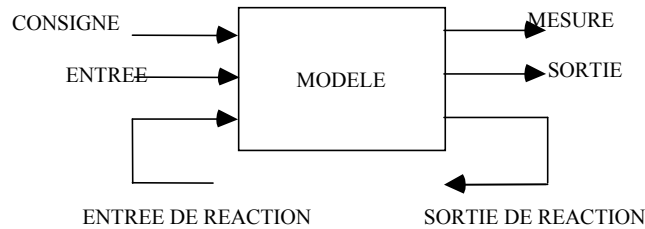


Figure 6 : Structure d'un composant

La modélisation de chacun des composants est basée sur l'étude des flux énergétiques. Par exemple, pour le moteur électrique, figure 7, un flux d'énergie électrique $Courant \cdot Tension$ est converti en un flux d'énergie mécanique $Couple \cdot Régime$.

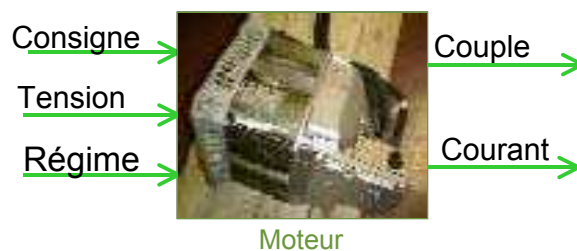


Figure 7 : Exemple de composant de la boîte à outils : le moteur électrique

Des compromis entre la précision du modèle et sa complexité ont du être faits, pour plus d'informations, le lecteur peut se référer au mémoire de thèse de /Paganelli 1999/ :

- La consommation de carburant du moteur thermique est estimée à partir de cartographies établies à partir de mesures sur un banc de test. La dynamique du couple du moteur thermique est représentée par un système du premier ordre. Le modèle ne prend pas en compte le fonctionnement à froid du moteur thermique.
- Le moteur électrique est un moteur à courant continu. Le temps de l'asservissement en couple étant inférieur à la période d'échantillonnage choisie pour la simulation, seul le comportement électromagnétique et les pertes (fer et mécaniques) ont été modélisés.
- Un modèle de batterie au plomb, basé sur la relation de Peukert, permet d'estimer la capacité apparente de la batterie et donc son état de charge. Son comportement électrique est assimilé à celui d'une source de tension en série avec une résistance

interne. Ces deux grandeurs sont des fonctions de l'état de charge, données par le constructeur.

- Le véhicule est modélisé comme une masse soumise à son inertie, au couple développé par le groupe motopropulseur et à différents efforts liés à l'environnement : résistance au roulement (contact pneu-route), résistance aérodynamique (pénétration du véhicule dans l'air), et résistance de montée en côte.

En simulation, le véhicule peut être asservi pour suivre un cycle de vitesse. Ces cycles de vitesse peuvent être issus de mesures effectuées sur un véhicule réel dans différentes situations (parcours urbain, routier, autoroutier, etc.) ou être des cycles normalisés, comme par exemple le CEN (Cycle Européen Normalisé), qui représente un parcours de 11km utilisé par les constructeurs européens pour mesurer la consommation moyenne des véhicules.

En assemblant les différents composants de la bibliothèque, différentes architectures de véhicules peuvent être modélisées. Par exemple, un véhicule conventionnel, figure 8, met en œuvre un moteur thermique relié à un véhicule

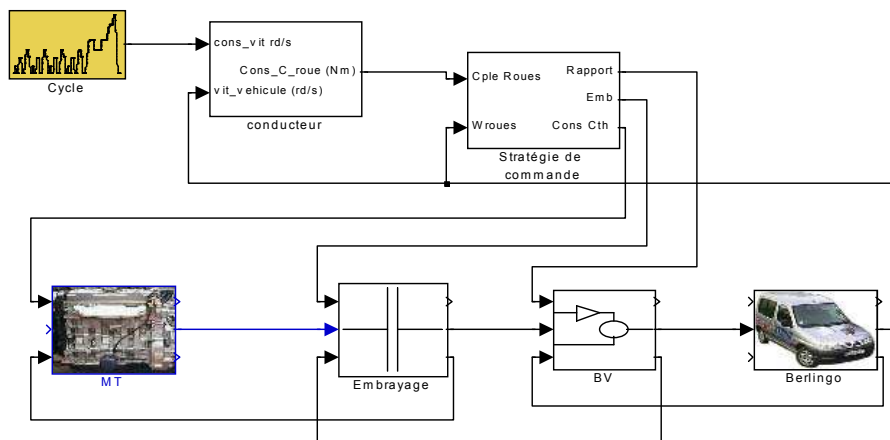


Figure 8 : Exemple de modélisation : véhicule conventionnel

Différentes études en simulation, en liaison avec le cahier des charges défini auparavant, ont abouti, en accord avec PSA Peugeot Citroën, à une architecture hybride parallèle simple arbre dont le modèle est donné sur la figure 9.

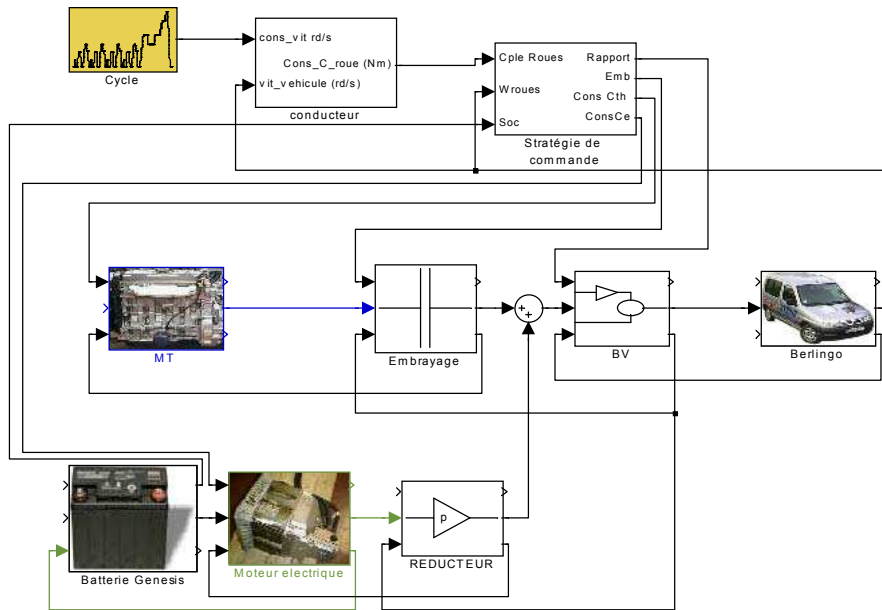


Figure 9 : Exemple de modélisation : architecture hybride parallèle simple arbre

1.4.2. Architecture et dimensionnement des composants /Paganelli 1999/

L'architecture retenue est présentée figure 10. L'addition du couple produit par les deux moteurs se fait au niveau de la connexion des deux moteurs sur le même arbre. Le 'patinage' de l'embrayage ayant été exclu pour des raisons d'efficacité énergétique, le moteur électrique est utilisé pour le démarrage du véhicule. L'embrayage n'est utilisé que pour accoupler / désaccoupler le moteur thermique du groupe motopulseur.

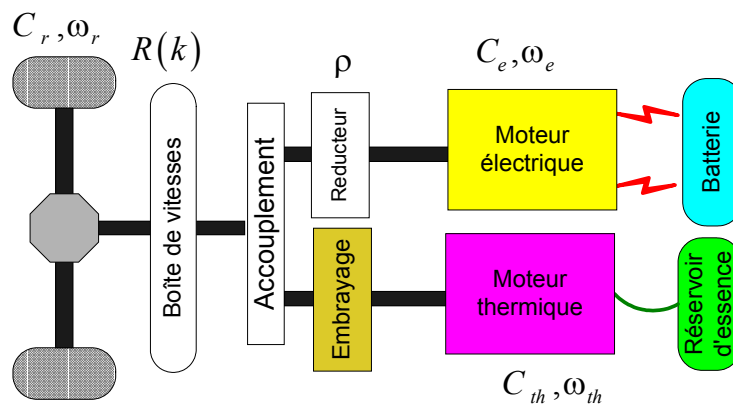


Figure 10 : Architecture du prototype

Les différents choix des composants et leur agencement sont explicités ci-après.

Le véhicule utilisé pour la construction du prototype est un utilitaire léger : Berlingo Citroën.

Le moteur thermique doit être suffisamment puissant pour pouvoir assurer la vitesse de croisière demandée (140km/h). Un moteur à essence déjà utilisé en série a été retenu. Sa cylindrée est de 1.4l, sa puissance maximale est de 75ch (55kW) à 5800tr/mn.

Le moteur électrique a été dimensionné pour pouvoir assurer l'accélération maximale du véhicule en mode électrique pur : 0-50km/h en 8s. Le moteur retenu est de type courant continu à excitation séparée alimenté en 240V déjà utilisé en série sur des véhicules électriques. Sa puissance maximale est de 43kW.

Le réducteur assure une double fonction. Il permet d'une part d'adapter la vitesse du moteur électrique de manière à ce que les deux moteurs atteignent leur régime maximal simultanément, et d'autre part, il assure l'accouplement et la transmission mécanique entre le moteur électrique et l'arbre primaire de la boîte de vitesses.

Essentiellement pour des raisons de coût, la technologie 'plomb pur' a été retenue pour les batteries. 20 modules de 12V-26Ah, représentant une masse de 200kg, assurent l'alimentation du moteur électrique et des différents accessoires du groupe motopropulseur (vérins, calculateurs, etc.).

Après une étude préliminaire des différentes possibilités, le nombre de rapports de la boîte a été fixé à deux, correspondant sensiblement aux rapports de seconde et de cinquième du Citroën Berlingo d'origine. La boîte de vitesses a nécessité une conception spécifique car elle doit pouvoir supporter un couple important (résultant de l'addition des couples maximum développés par chacun des moteurs).

L'ensemble du groupe motopropulseur prend place dans le compartiment moteur du véhicule, figure 11. Pour des raisons d'encombrement, le moteur électrique a été déporté au-dessus de la boîte de vitesses, une cascade de pignons permettant de relier les deux arbres moteurs.

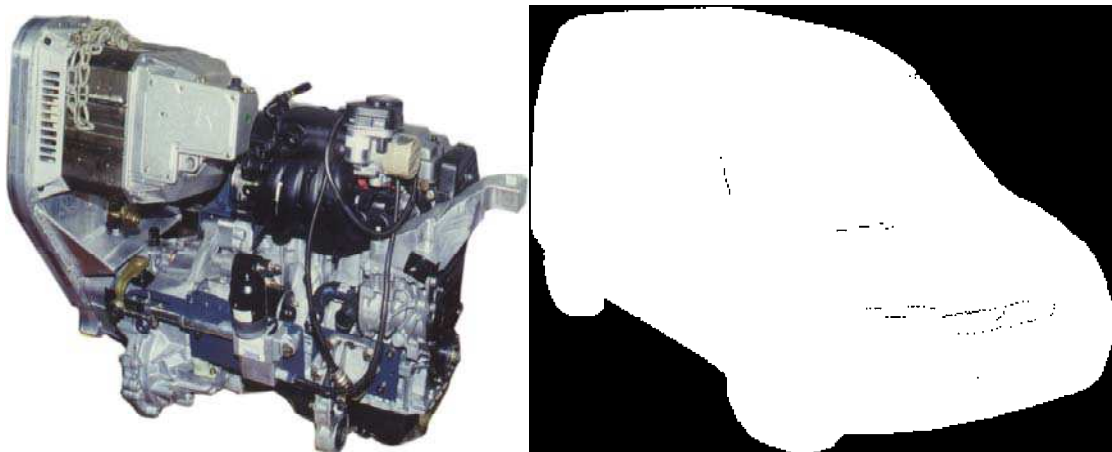


Figure 11: Le groupe motopropulseur assemblé et le véhicule prototype

L'architecture hybride parallèle simple arbre ayant été retenue, les principales grandeurs mécaniques mises en jeu (couple et régime) peuvent être explicitées par les relations mécaniques.

1.4.3. Relations mécaniques

Dans toute la suite, la lettre C désignera un couple, ω un régime, $R(k)$ le rapport de réduction du $k^{\text{ième}}$ rapport, t l'instant d'échantillonnage, η un rendement, les indices e le moteur électrique, th le moteur thermique, r les roues, red le réducteur, bv la boîte de vitesses.

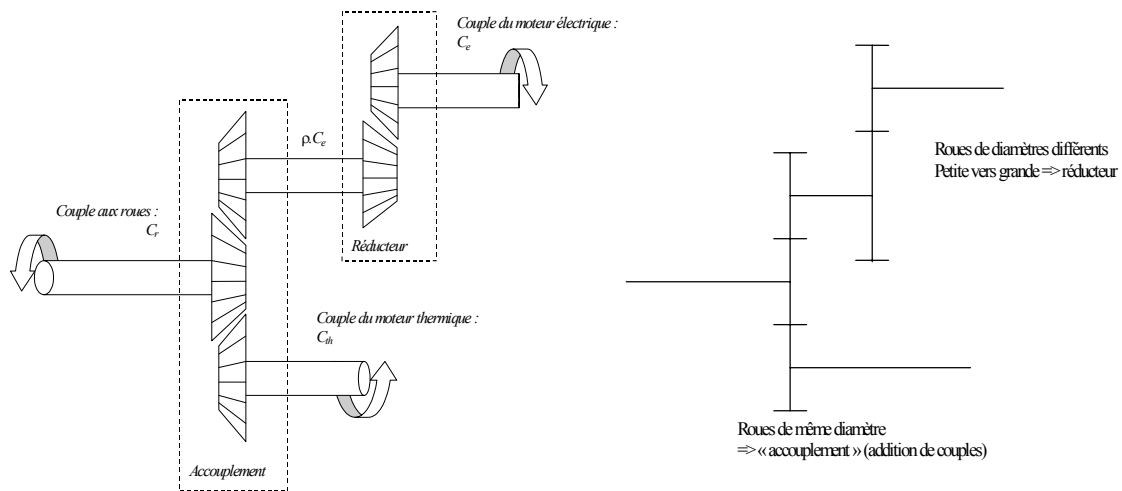


Figure 12 : Principe mécanique et schéma cinétique de la chaîne de traction

L'architecture retenue est dite à *addition de couples*, figure 12, car le couple aux roues est proportionnel à la somme du couple délivré par chacun des moteurs :

$$C_r(t) = R(k(t)) \cdot (\rho \cdot C_e(t) + C_{th}(t)) \quad (1.1)$$

Cependant, les rendements des différents éléments situés entre les moteurs et les roues doivent être pris en compte et insérés dans (1.1). On en déduit donc l'équation suivante :

$$C_r(t) = R(k(t)) \cdot (\rho \cdot C_e(t) \cdot \eta_{red} + C_{th}(t)) \cdot \eta_{bv} \quad (1.2)$$

L'architecture étant hybride parallèle simple arbre, le régime de chacun des moteurs est proportionnel à celui des roues :

$$\omega_r(t) = \frac{\omega_{th}(t)}{R(k(t))} = \frac{\omega_e(t)}{R(k(t)) \cdot \rho} \quad (1.3)$$

Les contraintes mécaniques du moteur électrique sont les suivantes :

$$0 < \omega_e(t) < \omega_{e_max} = \omega_{th_max} \cdot \rho \quad (1.4)$$

$$\text{et } C_{e_min}(\omega_e(t)) < C_e(t) < C_{e_max}(\omega_e(t)) \quad (1.5)$$

Les contraintes mécaniques du moteur thermique sont les suivantes :

$$\omega_{th_min} < \omega_{th}(t) < \omega_{th_max} \quad (1.6)$$

$$\text{et } 0 < C_{th}(t) < C_{th_max}(\omega_{th}(t)) \quad (1.7)$$

Nb : Le réducteur de la boîte de vitesse a été calculé pour que les deux moteurs atteignent

$$\text{simultanément leur régime maximal : } \rho = \frac{\omega_{e_max}}{\omega_{th_max}}$$

En simulation, le régime à la roue $\omega_r(t)$ peut être fourni par un cycle de vitesse, $C_r(t)$ est alors calculé en utilisant un modèle de véhicule. Dans le cas d'une application temps réel, $\omega_r(t)$ est mesuré et $C_r(t)$ est donné par le conducteur au travers de la position de la pédale d'accélérateur.

Les équations (1.2) et (1.3) montrent clairement que $\omega_r(t)$ et $C_r(t)$ étant connus, les seuls degrés de liberté sont le choix du rapport de boîte $k(t)$ et *un* des couples des moteurs : $C_e(t)$ ou $C_{th}(t)$.

1.5. Conclusion

Ce premier chapitre a rappelé quelques éléments de base des véhicules hybrides. Les différents composants ont été présentés ainsi que les trois grandes familles d'architectures que l'on peut rencontrer : série, parallèle et combinée.

Ce travail faisant suite aux travaux de doctorat de Gino Paganelli /Paganelli 1999/, les principaux outils qui seront repris dans la suite de ce mémoire ont été rappelés succinctement. Il s'agit en premier lieu, de l'outil de simulation modulaire mis en œuvre, qui permet

d'évaluer différentes architectures. En second lieu, un prototype ayant vu le jour, le choix de l'architecture et de ses composants est rapidement décrit.

Enfin, ce prototype servant de base à plusieurs études au cours de ce mémoire, les différentes relations mécaniques décrivant son architecture, ainsi que les diverses contraintes ont été données. La remarque principale étant pour cette architecture, dite parallèle hybride simple arbre, que la définition d'un point de fonctionnement instantané ne nécessite que la connaissance de deux variables, le rapport de boîte et le couple d'un des deux moteurs, les autres variables étant contraintes par les relations mécaniques.

L'objectif est alors de déterminer, pour une architecture donnée, à chaque instant, quelle commande utiliser en tenant compte de critères liés à la consommation et/ou la pollution. Les algorithmes dédiés à cette problématique sont appelés stratégies de commande.

Chapitre 2.

Stratégies de commande

2.1. Introduction : problématique générale	26
2.2. Stratégies de commande à base de règles	28
2.2.1. Fuzzy Torque Distribution Control /Won & Langari 2001/	28
2.2.2. Stratégie floue basée sur le rendement /N. Salman & al. 2000/	29
2.2.3. Stratégie de commande floue : Fuzzy Control Strategy (FCS) /Advisor 2001/	31
2.2.3.1. Principe	31
2.2.3.2. Résultats	35
2.3. Stratégies de commande basées sur une minimisation instantanée	37
2.3.1. Stratégie de Minimisation des pertes (LMS) /Seiler & Schröder 1998/	37
2.3.1.1. Principe	37
2.3.1.2. Gestion de l'état de charge	42
2.3.2. Consommation équivalente (ECMS) /Paganelli & al. 2000/	44
2.3.2.1. Consommation équivalente totale	45
2.3.2.2. Prise en compte de l'état de charge	48
2.3.3. Real Time Control Strategy (RTCS) /Johnson & al 2001/	50
2.4. Conclusion	50

2.1. Introduction : problématique générale

On s'attend à ce que les véhicules hybrides aient une consommation de carburant inférieure à celle de leur homologue conventionnel tout en conservant les mêmes performances. La principale différence concerne la gestion de deux sources d'énergie : si les stratégies de commande doivent aller dans le sens de la réduction de la consommation moyenne de carburant, il est nécessaire d'y intégrer la gestion de la deuxième source d'énergie. L'autonomie du véhicule en mode électrique est très souvent petite devant celle en mode thermique. Dans ce cas, la gestion de la batterie peut revenir, par exemple, à maintenir l'état de charge dans des limites acceptables, i.e., l'état de charge doit rester assez bas pour pouvoir profiter du freinage récupératif sans surcharger la batterie et suffisamment haut pour assurer, à tout moment, une autonomie minimale en mode électrique pur.

Une autre caractéristique attendue des véhicules hybrides est la réduction des émissions de polluants. Ce problème est extrêmement complexe, faisant intervenir des phénomènes chimiques et thermiques qui ne sont pas encore maîtrisés. Il n'existe pas, à notre connaissance, de modèles dynamiques d'émissions directement exploitables pour mettre en œuvre une stratégie de commande. Seules sont disponibles des cartographies valides pour un fonctionnement statique du moteur thermique. Il semble donc aujourd'hui difficile d'intégrer explicitement la minimisation des émissions de polluants si des fonctionnements dynamiques du moteur doivent être pris en compte /Lynch & al. 2001/. Deux cas sont possibles :

- le point de fonctionnement du moteur thermique est libre, par exemple, pour une architecture combinée on peut envisager d'avoir un point de fonctionnement quasi statique (régime et couple indépendants des conditions de conduite) autorisant la prise en compte des connaissances issues des cartographies statiques ;
- le point de fonctionnement du moteur thermique est partiellement contraint, par exemple pour une architecture simple arbre, son régime est imposé par le véhicule, et le couple est commandé. La dynamique du moteur thermique devient donc prépondérante et doit être prise en compte pour une éventuelle minimisation des émissions de polluants.

Néanmoins, dans ce dernier cas, des règles générales allant dans le sens d'une réduction des émissions peuvent s'appliquer à la commande du groupe motopropulseur. Elles sont externes aux algorithmes de gestion énergétique, et issues de l'expérience préalablement acquise. Par

exemple, le moteur thermique peut être allumé de manière à maintenir le catalyseur à sa température nominale de fonctionnement /Bartlett & Whalley 1998/, ou encore, les fortes variations de couple du moteur thermique peuvent être atténuées par l'utilisation du moteur électrique.

La suite de ce chapitre présente quelques stratégies de commande qui ont été appliquées sur des véhicules hybrides, ou qui sont applicables en commande temps réel. Elles sont regroupées en deux classes. La première correspond aux stratégies dont la synthèse fait appel à des connaissances empiriques apportées, par exemple par des experts. Dans ce contexte, un des formalismes privilégié fait appel aux ensembles flous, et les lois basées sur un régulateur à base de règles floues sont nombreuses, entre autres /Salman & al. 2000/ /Won & Langari 2001/ /Advisor 2001/. La deuxième classe concerne des stratégies basées sur l'analyse plus détaillée des échanges énergétiques entre les différents organes du groupe motopropulseur et le véhicule /Seiler & Schröder 1998/ /Paganelli & al. 1999/ /Johnson & al 2001/.

Avant d'explicitier les différentes stratégies de commande une remarque importante concernant le contexte des simulations doit être faite. Comme on le verra par la suite, les façons d'envisager la synthèse d'une stratégie sont nombreuses et peuvent provenir d'horizons variés. Certaines sont dédiées à une architecture particulière, d'autres sont plus générales, certaines font appel des outils classiques de la théorie de la commande, d'autres sont formalisées à partir de données qualitatives.

Il est néanmoins intéressant de confronter les plus intéressantes d'entre elles, mais au vu des remarques précédentes, cette tâche est loin d'être facile. Dans toute la suite, on a essayé, autant que faire se peut, de ne pas « trahir » l'esprit dans lequel les auteurs ont proposé leur stratégie.

Pour proposer un cadre commun, il a été décidé d'illustrer leur cycle de fonctionnement sur un cycle de vitesse particulier, cycle routier n°1, correspondant à un trajet péri-urbain, figure 17 et d'utiliser le modèle du Berlingo prototype présenté au chapitre précédent. Cependant, pour éviter des résultats trop « locaux », le réglage des algorithmes a été effectué de manière à obtenir un comportement « acceptable » pour une large gamme de fonctionnements possibles. Il s'agit dans ce chapitre, plus d'illustrer les principes mis en œuvre que d'effectuer une

comparaison (en termes de consommation par exemple). Ce dernier point fera l'objet d'une partie du quatrième chapitre.

2.2. Stratégies de commande à base de règles

Cette première catégorie de stratégies de commande s'appuie sur des connaissances empiriques traduites sous formes de règles à l'aide du formalisme des ensembles flous. Ces différentes connaissances peuvent être utilisées de diverses manières et sur différentes variables.

2.2.1. Fuzzy Torque Distribution Control /Won & Langari 2001/

Cette stratégie s'applique aux architectures à addition de couple. Le couple demandé aux roues est décomposé en deux parties. $C_r = C_{res} + C_{acc}$. C_{res} correspond au couple permettant de maintenir le véhicule à vitesse constante. Il est égal à la somme des différents couples de résistance à l'avancement du véhicule : aérodynamique, interaction pneus-route, résistance de montée en cote, etc. C_{acc} représente le couple nécessaire à l'accélération (ou décélération) du véhicule.

Le régulateur a trois entrées (couple moteur C_{acc} , régime du moteur thermique ω_{th} et l'état de charge de la batterie x) et une sortie (le couple du moteur thermique C_{th}). L'expertise est basée sur la dynamique du véhicule, les auteurs proposent de distinguer les différents modes de propulsion du véhicule suivants :

- Démarrage : $|C_{res}| = 0$ (couple résistant nul) $C_{acc} > 0$ (couple moteur positif)
- Accélération : $|C_{res}| > 0$, $C_{acc} > 0$
- Roulage : $|C_{res}| > 0$, $C_{acc} \approx 0$
- Décélération : $|C_{res}| > 0$, $C_{acc} < 0$
- Arrêt du véhicule : $|C_{res}| = 0$, $C_{acc} \approx 0$

Pour chacun des cinq modes de propulsion possibles, des répartitions de puissance sont proposées. Par exemple, pendant les accélérations, la consigne de couple du moteur électrique est C_{acc} , celle du moteur thermique est $|C_{res}|$, ce qui permet de bénéficier de la dynamique

rapide du moteur électrique asservi en couple. Ces répartitions sont dépendantes de l'état de charge de la batterie, par exemple, lors d'un roulage, en fonction de l'état de charge, le moteur électrique peut participer à la traction ou être utilisé pour recharger la batterie.

Trois bases de règles sont proposées au conducteur. Pour les deux premières, les accélérations et les fortes demandes de couple sont assurées principalement par le moteur électrique (respectivement thermique) tandis que le moteur thermique (respectivement électrique) délivre la puissance moyenne nécessaire à la propulsion du véhicule. La troisième base correspond à une pondération entre les deux bases précédentes.

Les auteurs explorent alors les réponses obtenues en simulation en utilisant ces trois types de régulateur. Néanmoins, outre le fait que les découpages des variables et l'obtention des règles soit empiriques, le fait d'explorer une pondération des situations extrêmes revient d'une certaine manière à explorer l'ensemble des répartitions de puissance possibles. Il n'y a aucune piste qui permette de déterminer une pondération optimale.

Une autre façon de mettre en œuvre une stratégie de commande est de considérer la répartition de puissance, non pas comme une fonction de la dynamique du véhicule, mais comme une fonction du rendement des différents moteurs.

2.2.2. Stratégie floue basée sur le rendement /N. Salman & al. 2000/

Cette stratégie s'applique à une architecture double arbre avec une boîte de vitesses à 5 rapports.

Le régulateur a trois entrées (la puissance demandée par le conducteur P_{roues} , le régime du moteur électrique ω_e et l'état de charge de la batterie Soc) et deux sorties (la puissance du moteur électrique : P_{elec} et un facteur de pondération α). Le régulateur n'est actif que durant la phase de traction ($P_{roues} \geq 0$) du véhicule, pendant les phases de freinage seul le moteur électrique est utilisé : $P_{elec} = P_{roues}$.

Le fonctionnement est basé sur une enveloppe de rendement admissible pour chacun des deux moteurs. Les deux situations « extrêmes » correspondent au cas où la puissance demandée P_{roues} est à l'intérieur de l'enveloppe admissible d'un des moteurs. Le mode adopté est alors *électrique pur* ou *thermique pur*. Un régulateur de type Sugeno permet alors de gérer le fonctionnement en mode *hybride*.

Une des particularités de cette stratégie est la gestion des rapports de boîte. La courbe de couple optimal étant connue et la puissance P_{th} obtenue par le régulateur, le régime ω_{th}^* du moteur thermique est solution de :

$$C_{opti}(\omega_{th}^*(t)) \cdot \omega_{th}^*(t) = P_{th}(t) \quad (2.1)$$

Il s'agit du point d'intersection de la courbe de couple optimal et d'une courbe d'iso-puissance P_{th} (courbes en pointillé figure 13).

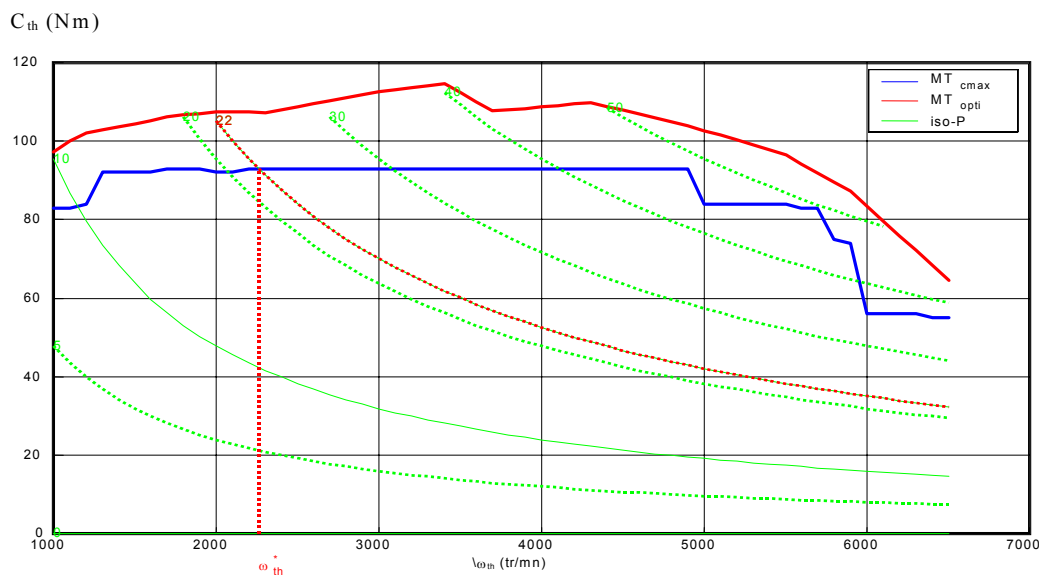


Figure 13 : Calcul du régime 'optimal' pour le moteur thermique

La figure 13 illustre le choix du régime $\omega_{th}^* = 2258$ tr/mn qui maximise le rendement pour une puissance $P_{th} = 22$ kW. Connaissant le régime des roues ω_r et ce régime ω_{th}^* du moteur thermique, on peut définir $R^* = \frac{\omega_{th}^*}{\omega_r}$, représentant le meilleur rapport de réduction dans cette configuration. Le numéro de rapport sélectionné k est alors celui dont la valeur du rapport de réduction est le plus proche de R^* . Le couple du moteur thermique est ensuite calculé pour assurer la puissance demandée avec le rapport sélectionné.

Le nombre de rapport étant limité, le couple du moteur thermique sera presque toujours différent du couple initialement déterminé. Cette stratégie, présentée pour un véhiculé équipé d'une boîte de vitesses manuelle, pourrait donner des résultats plus intéressants avec une CVT qui permet de faire varier continûment le rapport de réduction. De plus, les grandeurs

manipulées sont des puissances, or à puissance constante le rendement des moteurs varie fortement avec le régime.

2.2.3. Stratégie de commande floue : Fuzzy Control Strategy (FCS) /Advisor 2001/

La stratégie de commande (FCS) a été proposée dans le logiciel ‘Advisor’ librement disponible sur Internet /Advisor 2001/. Cette stratégie semblant intéressante, elle est décrite un peu plus en détails. Quelques résultats de simulation utilisant la modélisation citée précédemment et les caractéristiques du prototype disponible sont également présentés. Considérant que le moteur thermique est la principale source de pertes dans le groupe motopropulseur, son point de fonctionnement est ajusté pour maximiser son rendement. Les rapports de boîte sont choisis en se basant sur des règles d’agrément de conduite.

2.2.3.1. Principe

Afin d’illustrer le principe, la

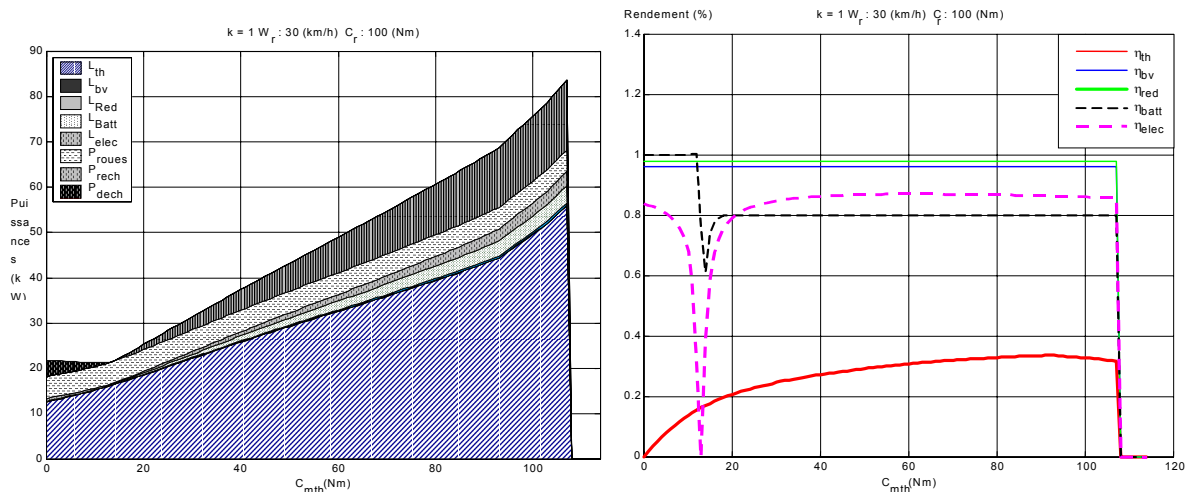


figure 14 a été obtenue dans les conditions suivantes : vitesse véhicule $\omega_r = 30 \text{ km/h}$, rapport de première, couple aux roues $C_r = 100 \text{ Nm}$, état de charge de 80%. La partie gauche illustre les pertes en montrant l’utilisation de la puissance fournie par les moteurs en fonction du couple du moteur thermique. La partie droite représente le rendement des principaux composants du groupe motopropulseur.

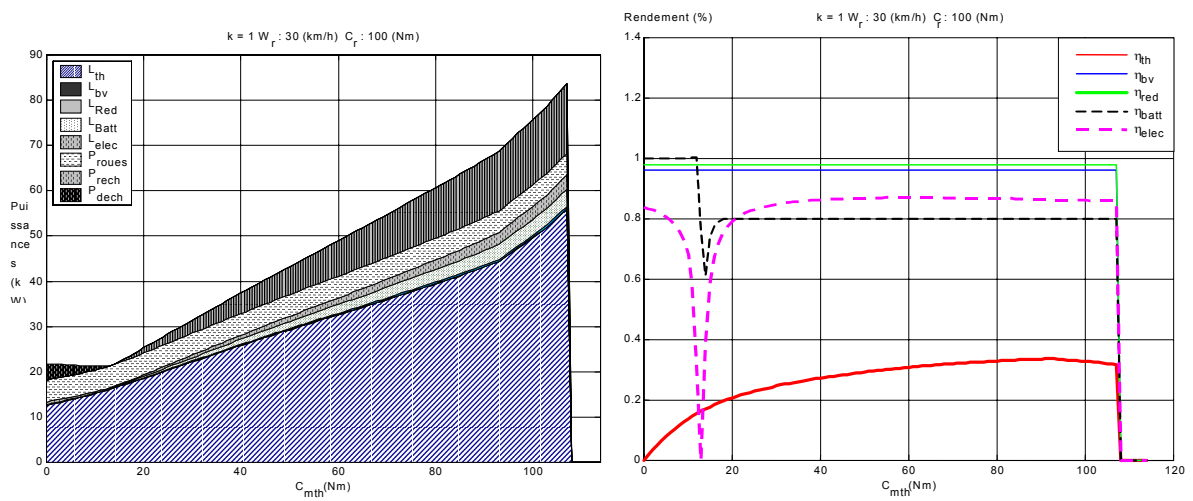


Figure 14 : Pertes et rendements du groupe motopropulseur

Le moteur thermique est responsable de la majorité des pertes, son rendement n'atteint environ que 30%,

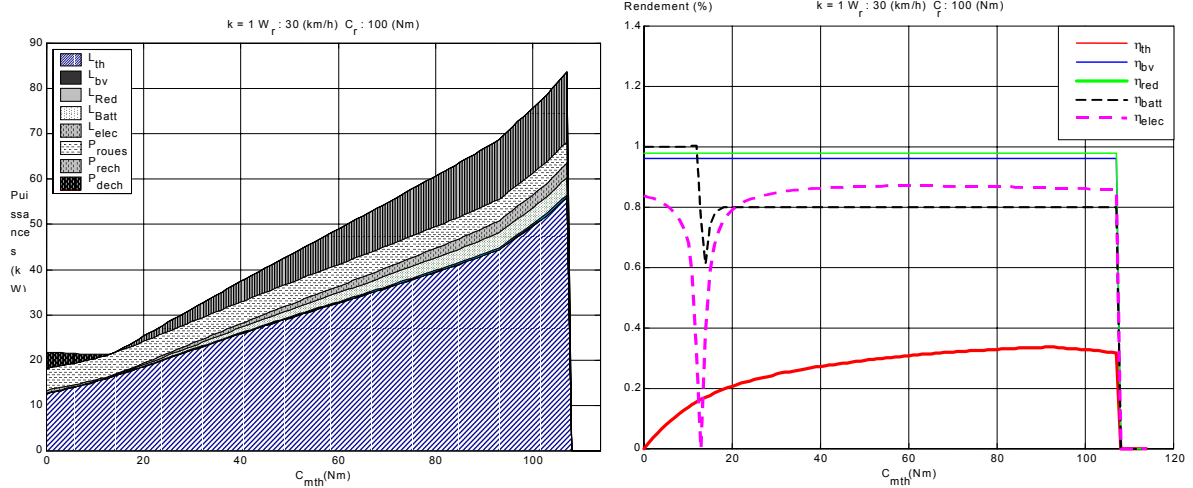


figure 14, alors que le rendement de chacun des autres composants dépasse les 80%. NB : Le rendement du moteur électrique chute à 0 lorsque le couple du moteur électrique approche 0, mais la puissance alors mise en jeu étant faible, les pertes sont quasi nulles.

L'illustration faite dans ce cas particulier, peut être étendue à tous les autres cas, il suffit pour cela de tracer les courbes d'iso-rendement dans un plan (couple, régime), figure 15.

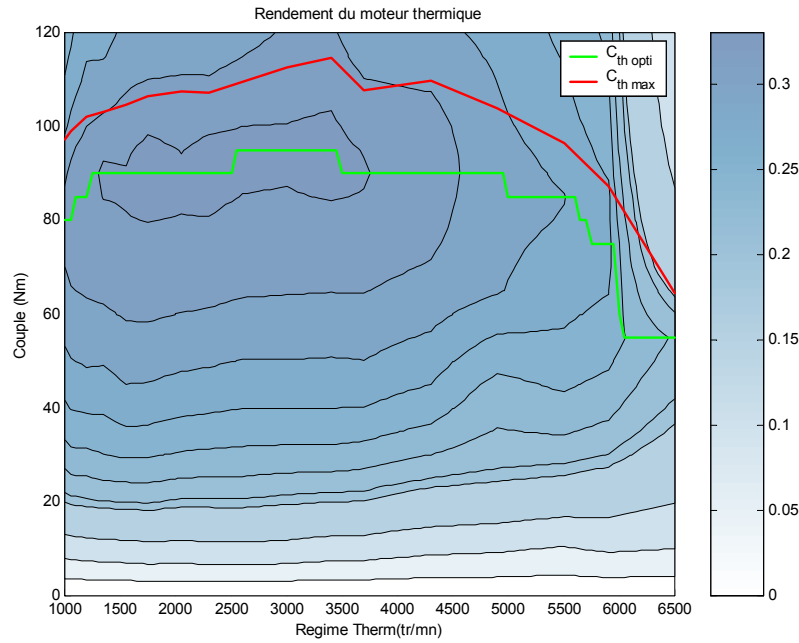


Figure 15 : Rendement du moteur thermique

On peut donc considérer que les pertes dans les autres composants sont négligeables en comparaison de celles du moteur thermique et que le rendement du moteur thermique est prépondérant dans le groupe motopropulseur. L'objectif de la stratégie est alors d'essayer de positionner le point de fonctionnement du moteur thermique sur la courbe pour laquelle le rendement du moteur thermique est maximal, figure 15.

Pour définir complètement la commande du groupe motopropulseur, la deuxième variable à définir est le numéro de rapport de boîte $k(t)$. Ce choix est fonction de règles d'agrément de conduite synthétisées dans une cartographie de passage de vitesses, figure 16.

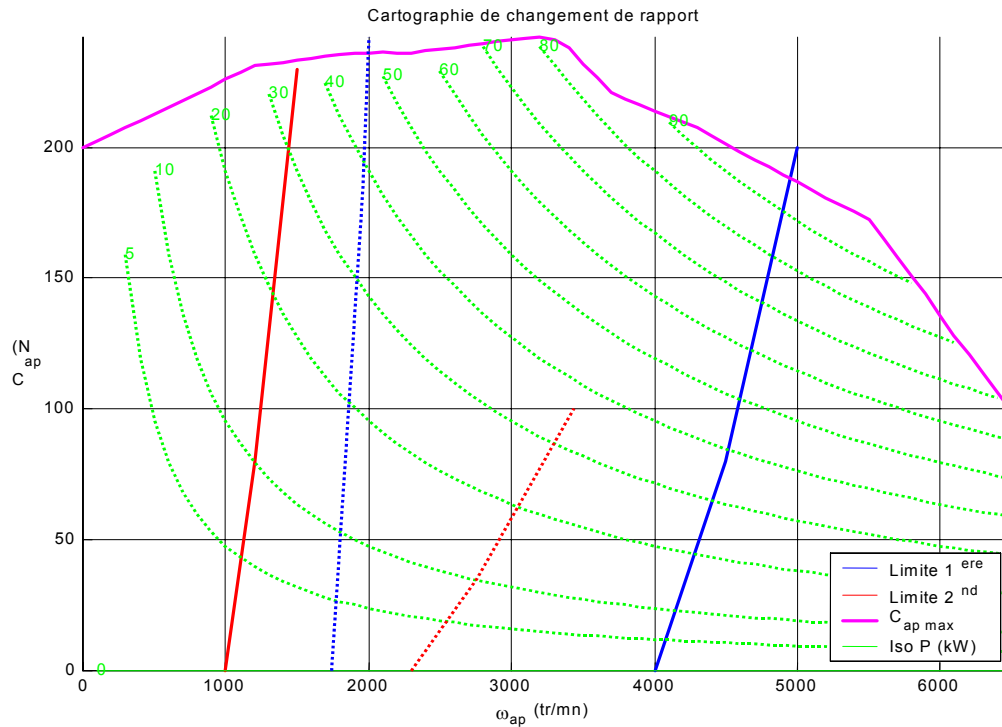


Figure 16 : Cartographie de changement de rapports

L'axe des abscisses est le régime de l'arbre primaire de la boîte de vitesses et l'axe des ordonnées représente la consigne de couple aux roues ramenée à l'arbre primaire de la boîte de vitesses : $\frac{C_r(t)}{R(k(t))}$. La courbe C_{ap_max} représente le couple maximal que peuvent

développer les deux moteurs simultanément. Le rapport sélectionné doit permettre de disposer de suffisamment de couple tout en évitant les sur-régimes. Dans le cas du Berlingo prototype, il n'y a que deux rapports et donc deux règles suffisent. Lorsque le point

$\left(\frac{C_r(t)}{R(k(t))}, \omega_r(t) \cdot R(k(t)) \right)$ franchi une limite donnée, l'autre rapport est engagé.

La figure 17 montre les résultats obtenus sur le cycle routier n°1. Aucune contrainte sur l'état de charge n'ayant été prise en compte pour le calcul de la commande, l'état de charge augmente de manière importante pouvant entraîner une surcharge de la batterie.

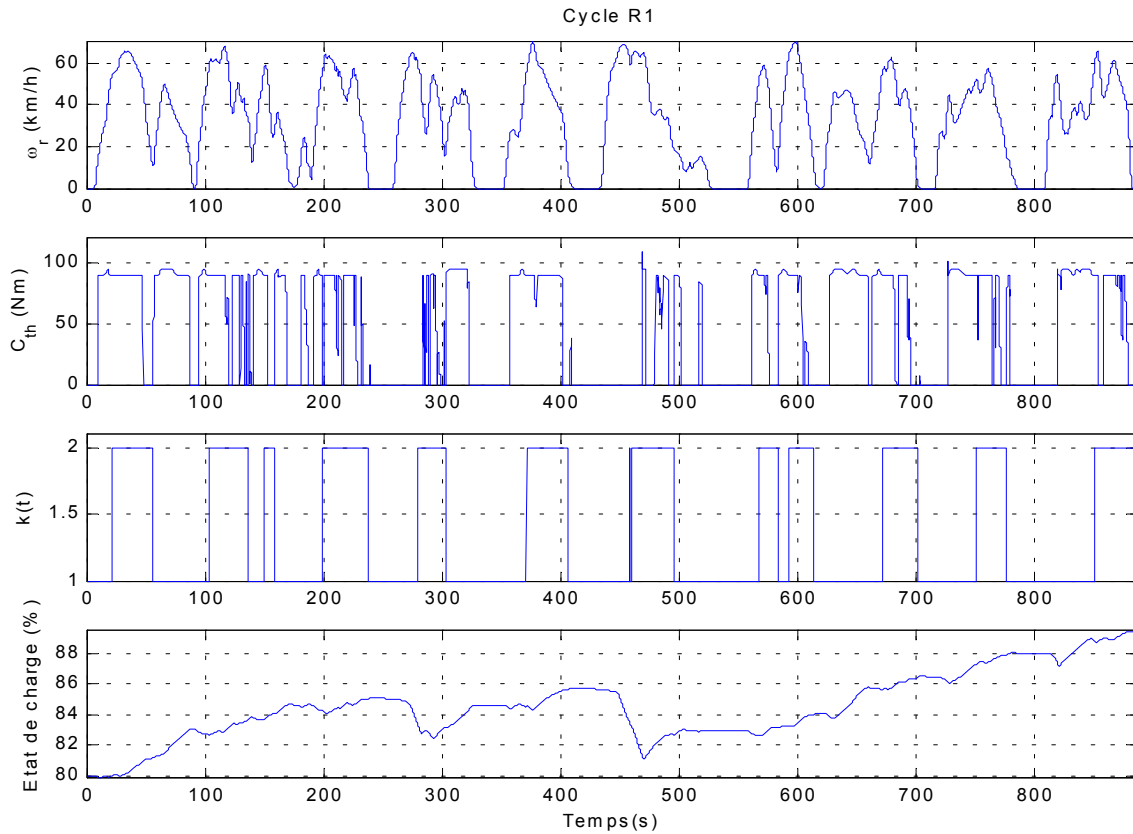


Figure 17 : Résultats pour le cycle Routier n°1

Cela illustre parfaitement la nécessité de tenir compte de la deuxième source d'énergie. Une manière de la prendre en compte est de contraindre l'état de charge.

En fonction de l'état de charge Soc , et du couple aux roues demandé C_r , un régulateur flou, ici de type Mamdani, permet de déterminer la consigne de couple à appliquer au moteur thermique, celle-ci correspondant au couple optimal si la contrainte sur l'état de charge est respectée. On pourra toutefois noter que la base est constituée de 121 règles.

2.2.3.2. Résultats

Dans les conditions de simulation précisées au début du chapitre (cycle routier n°1, Berlingo prototype) la consommation de carburant est de $10,5l/100km$ avec une variation globale d'état de charge de $+2,1\%$, figure 18.

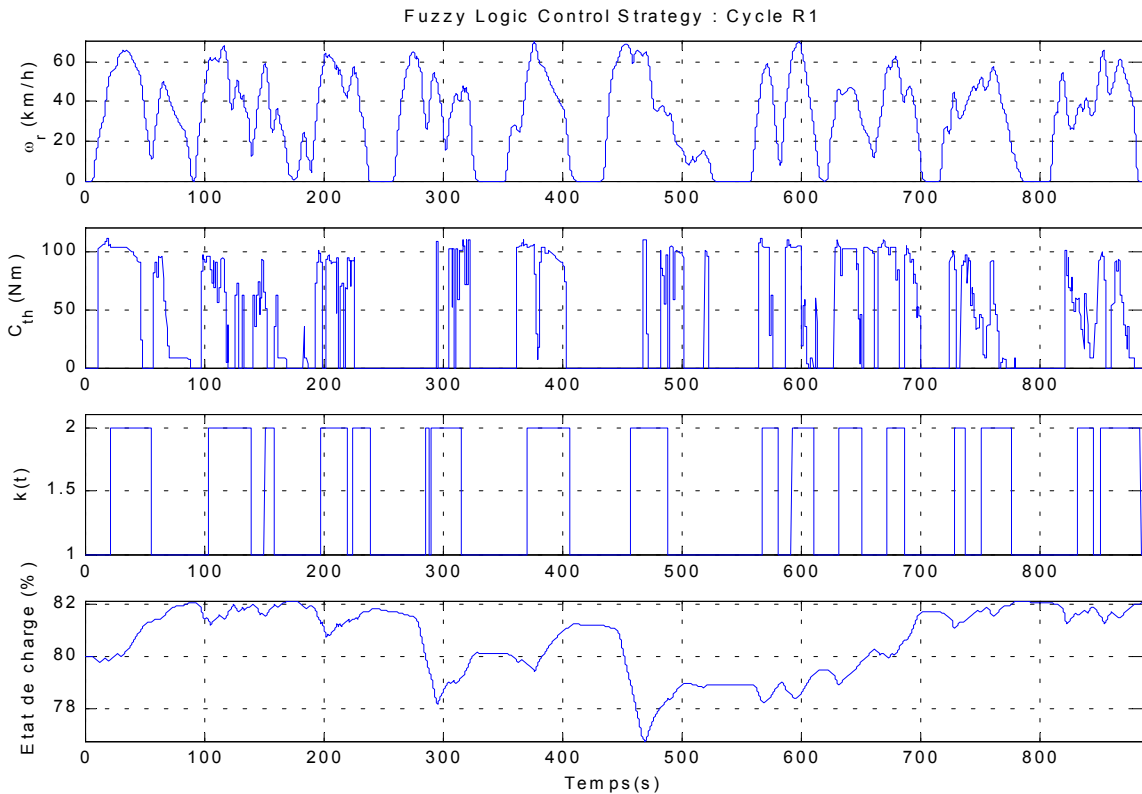


Figure 18 : Résultats de la stratégie de commande Fuzzy Logic Control Strategy pour le cycle Routier n°1

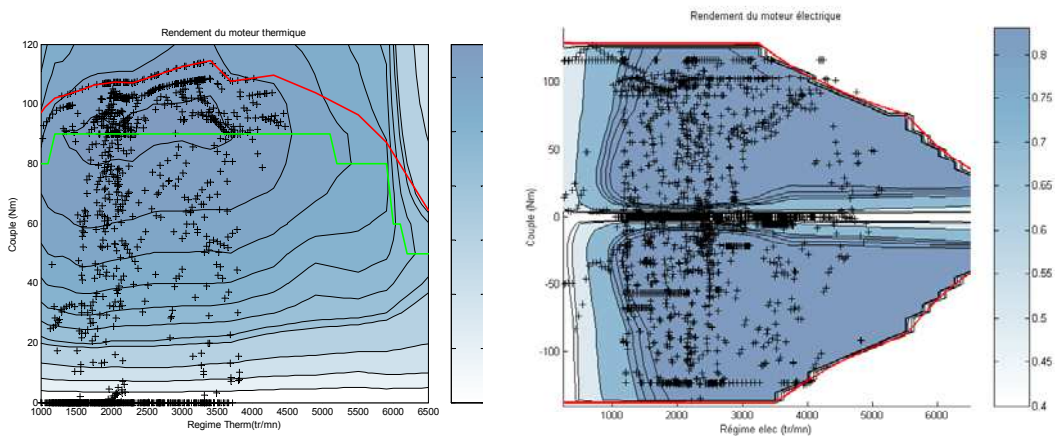


Figure 19 : Points de fonctionnement des deux moteurs par la stratégie de commande pour le cycle CEN

On peut remarquer que beaucoup de points de fonctionnement du moteur thermique sont positionnés près de la courbe de couple optimal et une partie des points de fonctionnement se trouvent dans des zones de rendement moyen afin de maintenir l'état de charge, figure 19.

La stratégie paraît intéressante, néanmoins, on peut se poser des questions concernant le découpage des variables en 11 valeurs linguistiques et le réglage des différents paramètres. Il n'y a pas de justification, même dans la littérature de la commande floue, d'un nombre aussi élevé de fonctions. Il est bien évident qu'il doit exister une combinaison plus propice de ces

différents paramètres, et que l'on peut même envisager leur réglage en utilisant une technique d'optimisation, néanmoins, les principes mis en œuvre semblent intéressants.

Avant de conclure cette partie, on peut noter qu'une technique d'optimisation basée sur les algorithmes génétiques a été utilisée pour éviter le réglage empirique du régulateur flou /Wang & al. 2001/. Le codage des individus de la population permet la prise en compte du support et du noyau de fonctions d'appartenance trapézoïdales et des conclusions des règles. Le critère est défini comme la somme pondérée de la consommation de carburant et de la variation globale d'état de charge.

Cette partie vient de proposer différentes approches empiriques du problème qui ont l'avantage de s'affranchir de connaissances trop précises des systèmes mis en œuvre. Elles permettent surtout d'apporter rapidement une solution exploitable en temps réel.

Néanmoins, une compréhension plus poussée des phénomènes mis en jeu semble également nécessaire, plusieurs travaux ont été réalisés dans ce sens et font l'objet du paragraphe suivant.

2.3. Stratégies de commande basées sur une minimisation instantanée

2.3.1. Stratégie de Minimisation des pertes (LMS) /Seiler & Schröder 1998/

Les pertes dans les différents composants du groupe motopropulseur peuvent être estimées, soit à l'aide de modèles de connaissances, soit par des mesures sur bancs d'essais. La stratégie de commande Loss Minimization Strategy (LMS) propose d'utiliser ces informations pour choisir, la répartition de puissance entre les deux moteurs qui minimise les pertes dans le groupe motopropulseur.

2.3.1.1. Principe

A chaque instant t , seule une partie de l'énergie prélevée dans la batterie et dans l'essence consommée sert effectivement à la propulsion du véhicule. L'autre partie est constituée par les pertes du moteur thermique, du moteur électrique, de la batterie, du réducteur, et de la boîte de vitesses. Cette stratégie de commande est basée sur une minimisation instantanée de ces pertes dans le groupe motopropulseur.

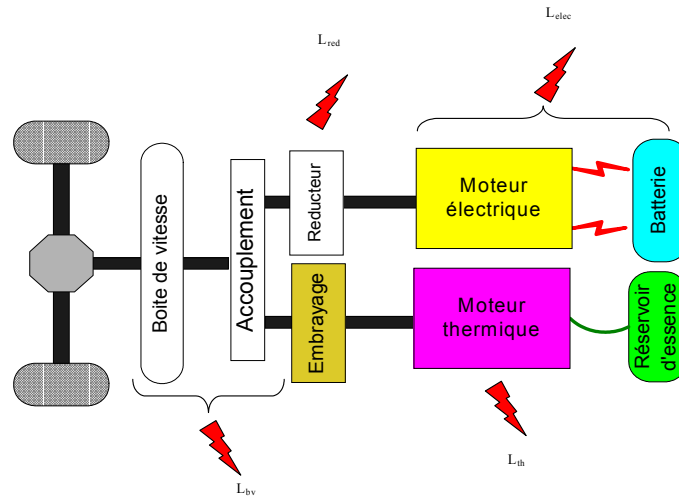


Figure 20 : Les pertes dans le groupe motopropulseur

- Puissance perdue dans la boîte de vitesses :

$$L_{bv}(C_{ap}(t), \omega_{ap}(t)) = (1 - \eta_{bv}) \cdot C_{ap}(t) \cdot \omega_{ap}(t) \quad (2.2)$$

Avec $C_{ap}(t)$ le couple sur l'arbre primaire et $\omega_{ap}(t)$ le régime de l'arbre primaire.

- Puissance perdue dans le réducteur :

$$L_{red}(C_e(t), \omega_e(t)) = (1 - \eta_{red}) \cdot C_e(t) \cdot \omega_e(t) \quad (2.3)$$

- Puissance perdue par le moteur thermique

Définir les pertes du moteur thermique nécessite de pouvoir évaluer la puissance que peut développer le débit d'essence consommée, i.e., la puissance développée par un moteur ayant un rendement unitaire. Cette puissance est difficilement estimable car elle dépend de nombreux paramètres (pouvoir calorifique de l'essence, température du moteur, richesse du mélange, etc.). Pour contourner ce problème, les auteurs proposent une définition basée sur la notion de consommation spécifique.

La consommation spécifique du moteur thermique est définie comme le rapport entre la consommation de carburant et la puissance produite sur l'arbre de sortie :

$$CSPE(C_{th}(t), \omega_{th}(t)) = \frac{D(C_{th}(t), \omega_{th}(t))}{C_{th}(t) \cdot \omega_{th}(t)} \quad (2.4)$$

Elle est proportionnelle à l'inverse du rendement du moteur thermique et n'est évidemment pas définie pour un régime nul ou un couple nul.

La définition des pertes dans le moteur thermique proposée par les auteurs est :

$$L_{th}(C_{th}(t), \omega_{th}(t)) = \frac{D(C_{th}(t), \omega_{th}(t))}{CSPE_{\min}} - C_{th}(t) \cdot \omega_{th}(t) \quad (2.5)$$

Avec $CSPE_{\min}$ la consommation spécifique minimale du moteur thermique.

Les pertes du moteur thermique sont donc définies comme la différence entre la puissance que le moteur aurait pu développer s'il avait eu une consommation spécifique constante égale à $CSPE_{\min}$ et la puissance réellement développée sur son arbre de sortie.

Les pertes sont nulles pour le point de fonctionnement $(C_{th}(t), \omega_{th}(t))$ pour lequel le rendement est maximal, c'est à dire où la consommation spécifique est minimale.

- Puissance perdue par le moteur électrique et la batterie :

$$L_e(C_e(t), \omega_e(t)) = P_{elec}(C_e(t), \omega_e(t)) - C_e(t) \cdot \omega_e(t) \quad (2.6)$$

Avec $P_{elec}(C_e(t), \omega_e(t))$ la puissance prélevée sur la batterie pour produire le couple $C_e(t)$ sur l'arbre du moteur électrique au régime $\omega_e(t)$.

En utilisant (1.2) et (1.3), l'ensemble des pertes peut se réécrire uniquement en fonction des variables de décision $C_{th}(t)$ et $k(t)$:

$$L'_{bv}(C_{th}(t), k(t), t) = L_{bv} \left(\frac{C_r(t)}{R(k(t)) \cdot \eta_{bv}}, \frac{\omega_r(t)}{R(k(t))} \right) \quad (2.7)$$

$$L'_{red}(C_{th}(t), k(t), t) = L_{red} \left(\frac{\frac{C_r(t)}{R(k(t)) \cdot \eta_{bv}} - C_{th}(t)}{\rho \cdot \eta_{red}}, \frac{\omega_r(t)}{R(k(t)) \cdot \rho} \right) \quad (2.8)$$

$$L'_{th}(C_{th}(t), k(t), t) = L_{th} \left(C_{th}(t), \frac{\omega_r(t)}{k(t)} \right) \quad (2.9)$$

La puissance perdue dans l'ensemble groupe motopropulseur est donnée par :

$$L_{tot}(C_{th}(t), k(t)) = L'_{bv}(C_{th}(t), k(t), t) + L'_{red}(C_{th}(t), k(t), t) + L'_e(C_{th}(t), k(t), t) + L'_{th}(C_{th}(t), k(t), t) \quad (2.10)$$

Pour une vitesse véhicule de 30 km/h et un couple au roues de 100 Nm , la figure 21 montre la répartition de puissance fournie par les moteurs dans le groupe motopropulseur, paramétrée en fonction de la consigne de couple du moteur thermique. La partie gauche correspond au rapport de première, la droite à celui de seconde. $P_{batt}(t)$ représente la puissance stockée dans la batterie et P_{roue} la puissance aux roues demandée par le conducteur.

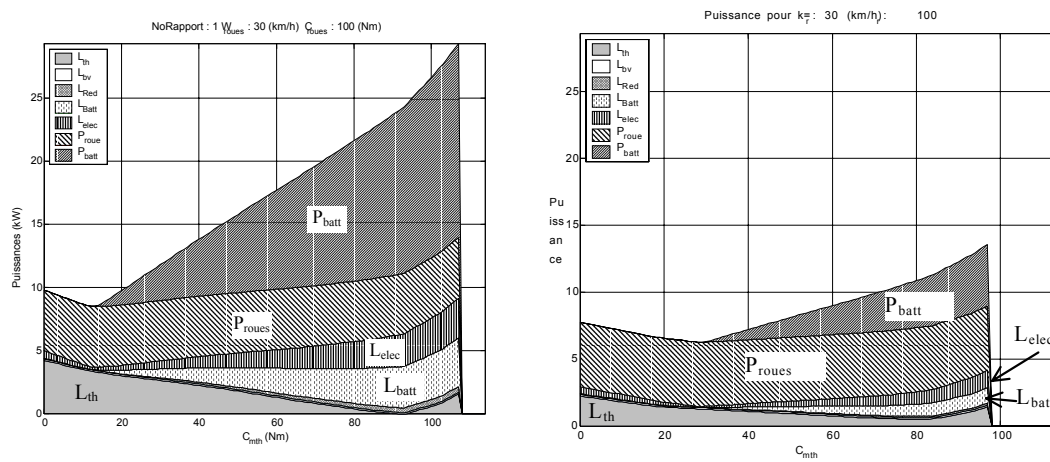


Figure 21 : Répartition de la puissance dans le groupe motopropulseur

L'ensemble des pertes $L_{tot}(C_{th}(t), k(t))$ est alors représenté figure 22. A chaque instant t , la commande $(C_{th}^*(t), k^*(t))$ qui minimise les pertes totales $L_{tot}(C_{th}(t), k(t))$ est alors appliquée au groupe motopropulseur.

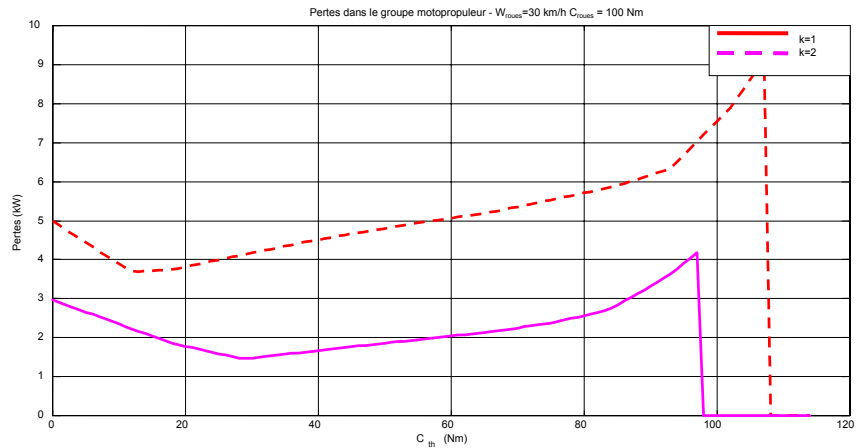


Figure 22 : Pertes totales dans le groupe motopropulseur

Dans les conditions de simulation précisées au début du chapitre (cycle routier n°1, Berlingo prototype), les résultats sont donnés figure 23. La consommation est de 6.26 l/100km et la variation globale d'état de charge est de -8%.

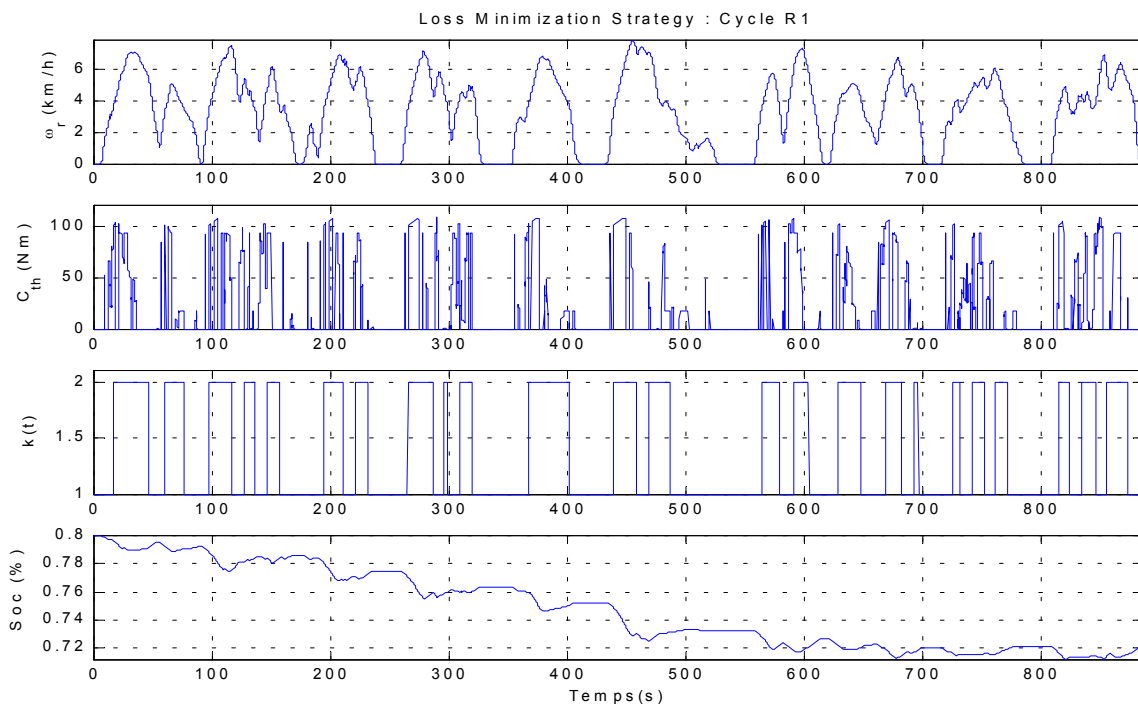


Figure 23 : Minimisation des pertes sur le cycle Routier n°1

La dérive de l'état de charge était prévisible car le choix des commandes est fait uniquement pour minimiser les pertes, sans tenir compte de l'état de charge. Pour avoir une stratégie à 'maintien d'état de charge' (Charge Sustaining), il est nécessaire d'utiliser en plus de la minimisation des pertes, un algorithme de gestion de l'état de charge de la batterie.

2.3.1.2. Gestion de l'état de charge

A chaque instant t , pour maintenir l'état de charge dans des limites acceptables, il est nécessaire de modifier les commandes calculées par minimisation des pertes. Notons que cela revient, dans tous les cas de figure, à augmenter les pertes.

La sensibilité est définie comme étant la variation des pertes dans le groupe motopropulseur sur la variation de courant dans la batterie.

$$S(C_{th}(t), k(t), t) = \begin{cases} 0 & \text{si } (C_{th}(t), k(t), t) = (C_{th}^*(t), k^*(t), t) \\ \frac{L_{tot}(C_{th}(t), k(t), t) - L_{tot}(C_{th}^*(t), k^*(t), t)}{I_{batt}(C_{th}(t), k(t), t) - I_{batt}(C_{th}^*(t), k^*(t), t)} & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.11)$$

Avec $I_{batt}(C_{th}(t), k(t), t)$ le courant circulant dans la batterie pour le couple aux roues $C_{th}(t)$ et le numéro de boîte $k(t)$.

La sensibilité représente le coût, en terme d'augmentation des pertes dans le groupe motopropulseur, associé à une variation du courant :

$$\Delta I_{batt}(C_{th}(t), k(t), t) = I_{batt}(C_{th}(t), k(t), t) - I_{batt}(C_{th}^*(t), k^*(t), t).$$

Afin de maîtriser le coût associé au maintien de l'état de charge, lorsque l'état de charge est trop bas, les commandes choisies sont celles qui minimisent (respectivement maximisent) le courant dans la batterie avec une sensibilité $S(C_{th}(t), k(t), t)$ supérieure (respectivement inférieure) à un seuil S_{lim} . Ce seuil est simplement la valeur maximale autorisée pour $|S(C_{th}(t), k(t), t)|$. Il est exprimé, de façon empirique (fonction du cycle, de l'architecture, du dimensionnement des composants, etc.) comme une fonction de l'erreur $\Delta Soc = Soc - Soc_{vise}$ entre l'état de charge Soc et la valeur d'état de charge visée Soc_{vise} , figure 24.

La courbe figure 24 a été obtenue après des essais sur plusieurs cycles pour le Berlingo prototype. Lorsque ΔSoc n'est pas autour de 0, il est nécessaire d'agir rapidement, ce qui explique la forte pente de la partie centrale.

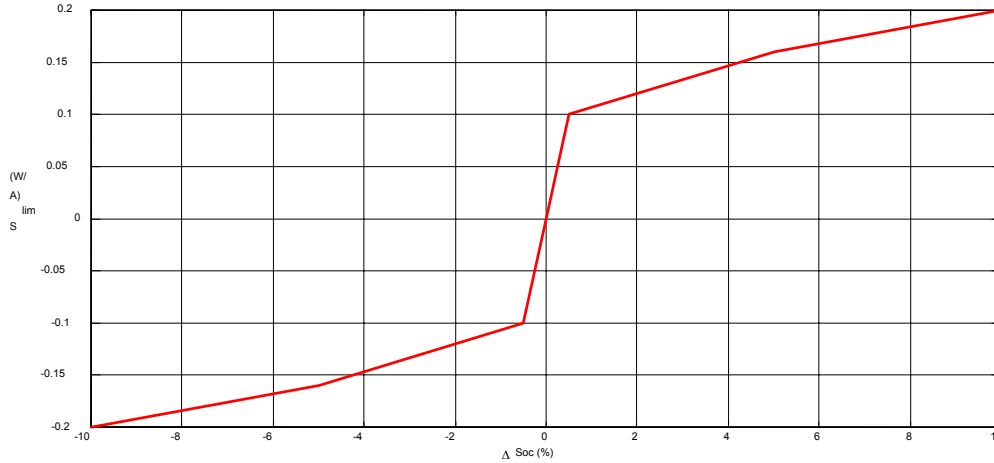


Figure 24 : Sensibilité maximale autorisée en fonction de l'état de charge

L'algorithme de la stratégie de commande est donc le suivant :

$$(C_{th}^*(t), k^*(t)) = \arg \min_{(C_{th}(t), k(t))} L_{tot}(C_{th}(t), k(t), t).$$

1. $S_{lim} = f(\Delta Soc) = f(Soc - Soc_{vise})$ à partir de la figure 24.

2. Si $Soc \leq Soc_{vise}$ alors

$$(C'_{th}(t), k'(t)) = \arg \max_{(C_{th}(t), k(t))} I_{batt}(C_{th}(t), k(t), t), \text{ sous la contrainte :}$$

$$S(C_{th}(t), k(t), t) > S_{lim}(\Delta Soc).$$

Sinon

$$(C'_{th}(t), k'(t)) = \arg \min_{(C_{th}(t), k(t))} I_{batt}(C_{th}(t), k(t), t) \text{ sous la contrainte :}$$

$$S(C_{th}(t), k(t), t) < S_{lim}(\Delta Soc).$$

Fin

3. Afin d'éviter de trop fortes variations de couple du moteur thermique, la consigne de couple $C'_{th}(t)$ est filtrée avec une filtre passe bas d'ordre 1.

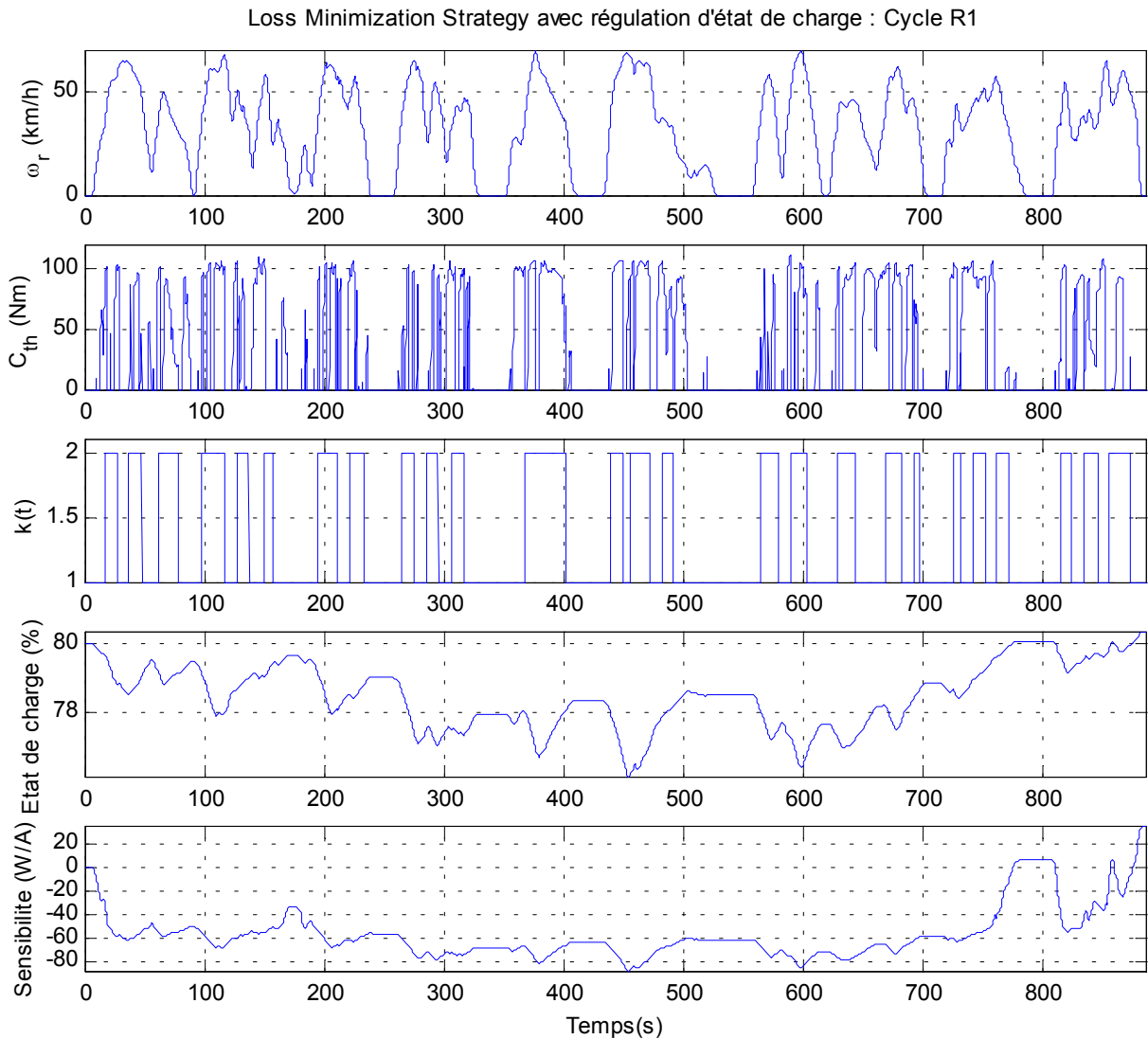


Figure 25 : Résultat de la stratégie LMS avec régulation d'état de charge sur le cycle Routier n°1

Dans les conditions de simulation précisées au début du chapitre (cycle routier n°1, Berlingo prototype), les résultats sont donnés figure 25. La consommation de carburant est de 9.6 l/100km et la variation globale d'état de charge est de 0.34%.

Notons pour conclure sur cette stratégie, que l'analyse des pertes propose une manière analytique de traiter le problème, mais, que l'ensemble repose sur une analyse de sensibilité, dont le réglage reste « empirique ».

2.3.2. Consommation équivalente (ECMS) /Paganelli & al. 2000/

Une autre façon de prendre en compte les phénomènes mis en jeu est de considérer l'étude des flux énergétiques dans le groupe motopropulseur proposée par la stratégie de commande Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS).

Les prototypes considérés dans ce travail, présentent tous la caractéristique de disposer d'une source d'énergie réversible de faible capacité par rapport à la source d'énergie irréversible. Dans ce contexte, sur un long parcours, la propulsion sera principalement assurée par le moteur thermique. Par conséquent la batterie peut être vue comme un tampon énergétique qui peut permettre de diminuer la quantité de carburant consommée.

La gestion énergétique peut alors se résumer à deux cas. Le premier correspond à une quantité d'énergie prélevée à un instant t sur la batterie. Si on considère qu'elle doit être restituée à un instant $t_f > t$, au moyen du moteur thermique, à cet instant t_f la quantité d'essence consommée devra permettre la traction du véhicule et la recharge de l'énergie prélevée à l'instant t , entraînant une sur-consommation de carburant. Le deuxième cas correspond au cas inverse, i.e., une recharge de la batterie à un instant t . A un instant $t_f > t$, l'énergie emmagasinée permettra de contribuer à la traction du véhicule et de soulager le moteur thermique entraînant une diminution de la consommation de carburant.

L'utilisation de la batterie à un instant t affecte donc la consommation ultérieure de carburant. La batterie peut donc être vue comme un réservoir de carburant auxiliaire réversible. Sous certaines hypothèses, en tenant compte de tous les rendements de la chaîne de traction, il est possible de calculer un coût de carburant équivalent, noté $D_{equi}(C_{th}(t), k(t))$, associé à la sollicitation de la batterie.

2.3.2.1. Consommation équivalente totale

Considérons tout d'abord le circuit énergétique de la chaîne de traction lorsque la batterie est sollicitée en décharge.

Comme le montre la figure 26, si à un instant t , les commandes $(C_{th}(t), k(t))$, conduisent à la décharge de la batterie, la recharge de la batterie (partie en pointillés) se fera, ultérieurement, grâce au moteur thermique à travers un certain nombre d'éléments mécaniques et avec un rendement hypothétique moyen qui ne peut en aucun cas être calculé à l'avance, car les couples qui seront alors appliqués sont a priori inconnus. Le débit équivalent du moteur électrique $D_{equi}(C_{th}(t), k(t))$ correspond au carburant qui serait utilisé par le moteur thermique pour produire, à son rendement moyen, la puissance mécanique nécessaire à la recharge de la batterie.

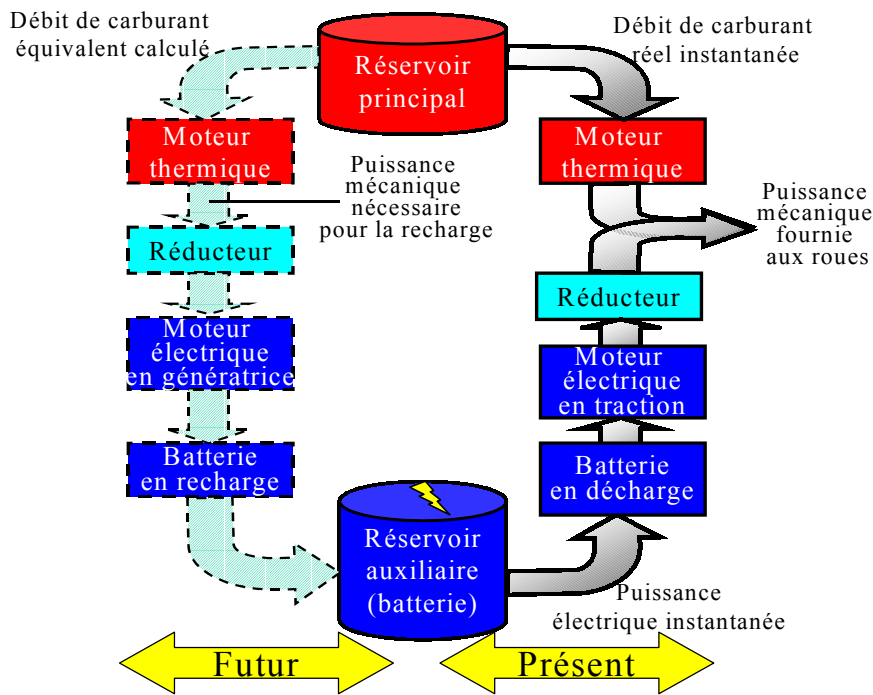


Figure 26 : Chemin énergétique de la chaîne électrique lors d'une décharge de la batterie.

La phase de recharge de la batterie est représentée sur la figure 27. La batterie étant rechargée, le débit équivalent $D_{equi}(C_{th}(t), k(t))$ est négatif et correspond au carburant qui serait utilisé par le moteur thermique pour produire la même puissance mécanique à son rendement moyen. Le cas de la récupération d'énergie lors du freinage du véhicule est similaire.

Les rendements hypothétiques moyens peuvent être estimés, pour la batterie /Magyar & al. 1990/, en prenant en compte les pertes joules et le rendement faradique, et en considérant un état de charge moyen et, pour les moteurs, en analysant la variation du rendement en fonction du point de fonctionnement. Il devient donc possible de calculer le débit équivalent du moteur électrique.

Le débit équivalent total $D_{equi_tot}(C_{th}(t), k(t))$ est égal à la somme de la consommation équivalente du moteur électrique et de la consommation réelle du moteur thermique $D(C_{th}(t), k(t))$:

$$D_{equi_tot}(C_{th}(t), k(t)) = D_{equi}(C_{th}(t), k(t)) + D(C_{th}(t), k(t)) \quad (2.12)$$

La consommation équivalente totale permet de prendre en compte, de manière unifiée, la consommation du moteur électrique et du moteur thermique.

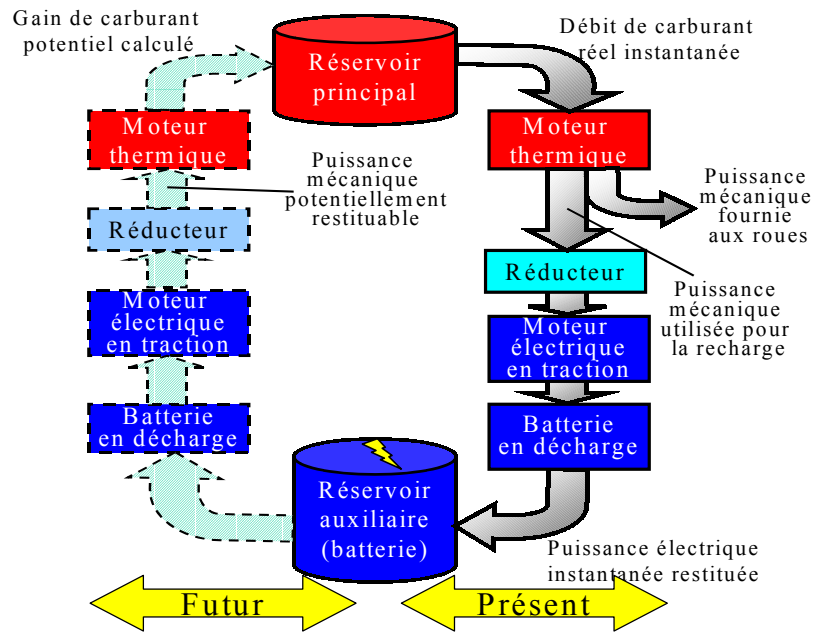


Figure 27 :Echanges énergétiques de la chaîne électrique lors d'une recharge

A chaque instant t , la stratégie de commande choisit la commande $(C_{th}^*(t), k^*(t))$ qui minimise la consommation équivalente totale.

Dans les conditions de simulation précisées au début du chapitre (cycle routier n°1, Berlingo prototype), les résultats sont donnés figure 28.

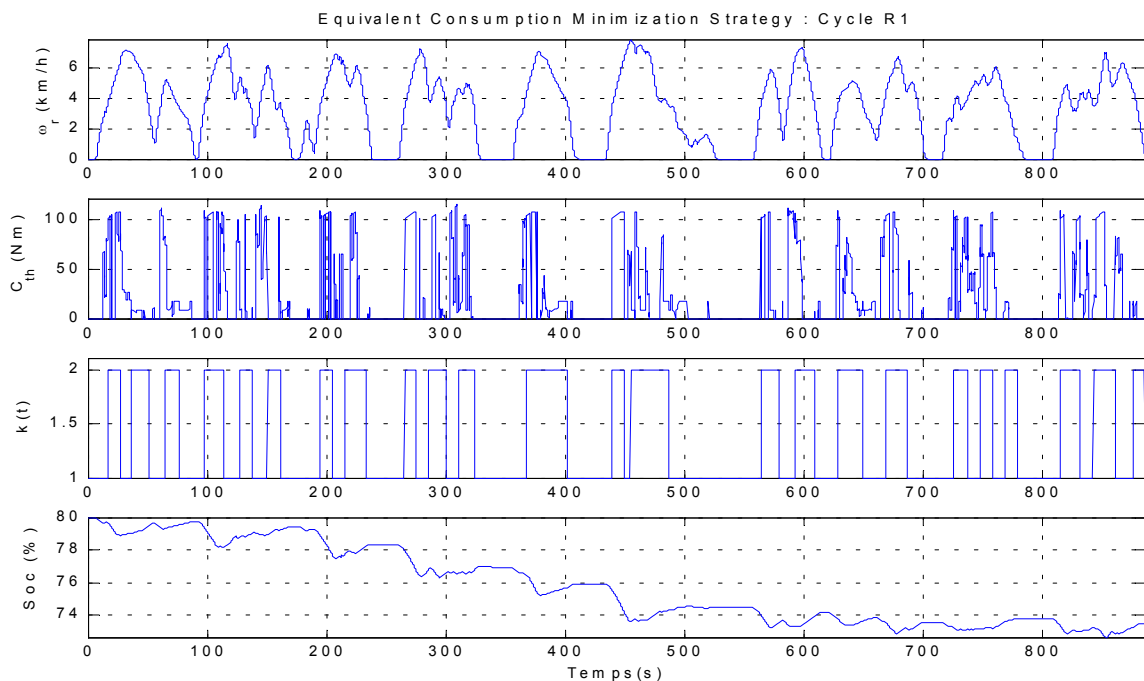


Figure 28 : Résultats de la minimisation de la consommation équivalente sur le cycle R1

Comme dans le cas précédent (LMS), sans contrainte sur l'état de charge, la figure 28 montre une dérive de ce dernier.

2.3.2.2. Prise en compte de l'état de charge

Afin de maintenir l'état de charge sensiblement constant, la méthode utilisée est inspirée de l'étude de sensibilité proposée pour LMS /Seiler & Schröder 1998/. La sensibilité est définie comme la variation de débit équivalent total sur la variation de courant :

$$S(C_{th}(t), k(t), t) = \frac{D_{equi_tot}(C_{th}(t), k(t), t) - D_{equi_tot}(C_{th}^*(t), k^*(t), t)}{I_{batt}(C_{th}(t), k(t), t) - I_{batt}(C_{th}^*(t), k^*(t), t)} \quad (2.13)$$

Les variations des valeurs de $C_{th}(t), k(t)$ en fonction de l'état de charge $Soc(t)$ sont alors traitées de la même manière que précédemment. Il est donc nécessaire de définir un seuil de sensibilité S_{lim} correspondant à la valeur maximale autorisée pour $|S(C_{th}(t), k(t), t)|$. La courbe figure 29 a été obtenue après des essais sur plusieurs cycles pour le Berlingo prototype.

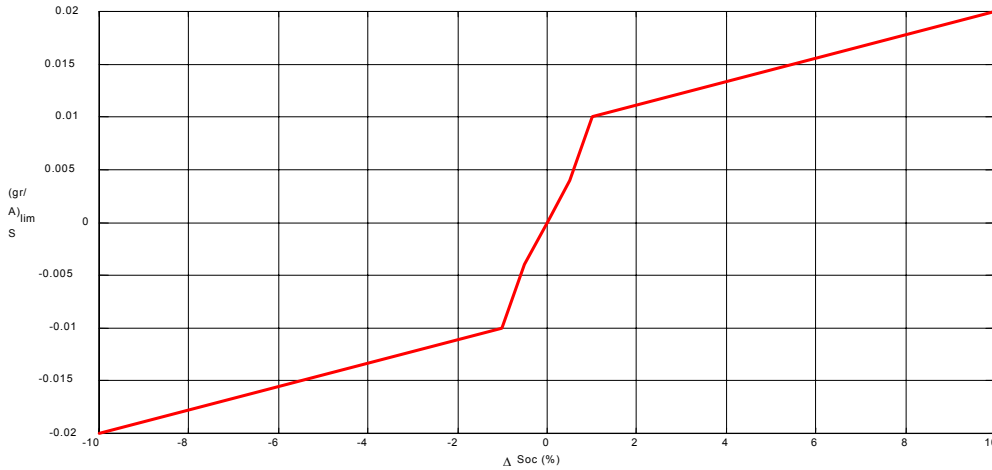


Figure 29 : Sensibilité limite S_{lim} en fonction de l'erreur d'état de charge

La stratégie Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS) consiste donc, à chaque instant t :

1. $(C_{th}^*(t), k^*(t)) = \arg \min_{(C_{th}(t), k(t))} Deb_{tot}(C_{th}(t), k(t), t)$
2. $S_{lim} = f(\Delta Soc) = f(Soc - Soc_{vise})$ est déterminée à partir de la fonction figure 29.
3. Si $Soc \leq Soc_{vise}$ alors

$$(C'_{th}(t), k'(t)) = \arg \max_{(C_{th}(t), k(t))} I_{batt}(C_{th}(t), k(t), t), \text{ sous la contrainte :}$$

$$S(C_{th}(t), k(t), t) > S_{lim}(\Delta Soc).$$

Si non

$$(C'_{th}(t), k'(t)) = \arg \min_{(C_{th}(t), k(t))} I_{batt}(C_{th}(t), k(t), t) \text{ sous la contrainte :}$$

$$S(C_{th}(t), k(t), t) < S_{lim}(\Delta Soc).$$

Fin

Dans les conditions de simulation précisées au début du chapitre (cycle routier n°1, Berlingo prototype), les résultats sont donnés figure 30.

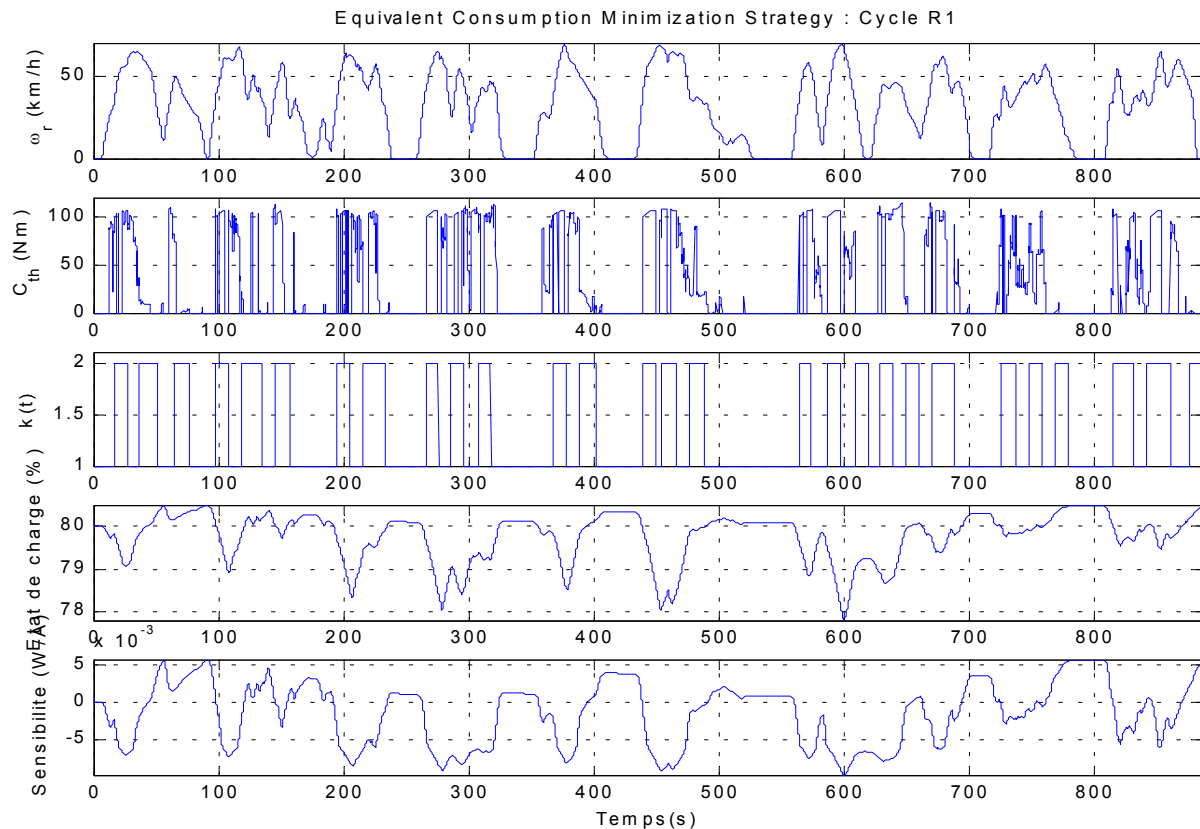


Figure 30 : ECMS avec régulation d'état de charge

Pour le même cycle que l'essai précédent, maintenant l'état de charge est maintenu proche de sa valeur nominale (80%). La consommation de carburant est de 10,5 l/100km et la variation globale d'état de charge 0,42%. Avant de conclure, le paragraphe suivant présente une stratégie également basée sur une consommation équivalente du moteur électrique.

2.3.3. Real Time Control Strategy (RTCS) /Johnson & al 2001/

Cette stratégie utilise un principe similaire à la stratégie ECMS : à chaque instant le point de fonctionnement choisi est celui qui minimise une consommation équivalente totale. Cependant, plutôt que d'utiliser des rendements hypothétiques à l'instar d'ECMS, RTCS analyse les points de fonctionnement passés pour en déduire les rendements moyens sur une fenêtre temporelle glissante. Ce système permet donc d'adapter les rendements hypothétiques moyens aux conditions d'utilisation du véhicule.

De plus, cette stratégie est censée prendre en compte les émissions de polluants. En principe, le problème devient multi-critères. Pour garder une approche mono-critère simple, les polluants sont introduits dans le critère à l'aide de coefficients de pondération.

$$J = D_{th}(\omega_{th}(t), C_{th}(t)) + D_{elec}(C_e(t), \omega_e(t)) + \lambda_{Nox} \cdot C_{Nox}(C_{th}(t), \omega_{th}(t)) + \lambda_{HC} \cdot C_{HC}(C_{th}(t), \omega_{th}(t)) + \dots \quad (2.14)$$

Avec $D_{th}(\omega_{th}(t), C_{th}(t))$ et $D_{elec}(C_e(t), \omega_e(t))$ les consommations du moteur thermique et équivalente du moteur électrique, $C_{xx}(C_{th}(t), \omega_{th}(t))$ les cartographies des émissions du polluant xx et λ_{xx} son coefficient de pondération associé.

Les cartographies des émissions de polluants ne représentent que le comportement statique du moteur. Or, les comportements transitoires sont importants et ne peuvent donc être négligés. Les estimations obtenues ne sont donc valides que si le moteur thermique a un fonctionnement quasi-statique. Ce fonctionnement particulier ne peut être obtenu qu'avec certaines architectures de véhicule hybride (combinée ou série) dans certaines conditions (dimensionnement des moteurs, des batteries, etc.).

La stratégie proposée ne prenant pas en compte la contrainte sur la dynamique du moteur thermique, il convient donc d'être prudent sur l'interprétation des résultats.

2.4. Conclusion

Plusieurs stratégies de commande utilisables en temps réel ont été présentées. Certaines d'entre elles utilisent des régulateurs flous qui permettent une mise en œuvre rapide, sans avoir à étudier de manière trop approfondie les échanges énergétiques. Il est bien évident que ces stratégies ne peuvent pas être générales, ni pour plusieurs architectures, ni pour plusieurs types de véhicules. Elles semblent plus correspondre à la résolution, parfois efficace, d'un cas particulier.

D'autres approches ont été proposées prenant en compte une compréhension plus poussée des phénomènes mis en jeu. La stratégie de commande LMS (Loss Minimization Strategy) est basée sur une minimisation instantanée des pertes dans le groupe motopropulseur. La stratégie ECMS (Equivalent Consumption Minimization Strategy) minimise la consommation équivalente du groupe motopropulseur. Dans les deux cas, la gestion de l'état de charge est réalisée sur la base d'une analyse de sensibilité.

Cette partie concernant l'état de charge est un des points cruciaux, et son réglage peut prêter à beaucoup de discussions. Il s'agit forcément d'un compromis entre les performances de la régulation d'état de charge et la consommation de carburant, encore faut-il s'entendre sur ce compromis. Pour les simulations réalisées au cours de ce chapitre, l'état de charge est simplement régulé pour rester dans une plage de valeurs acceptables. Elles ne permettent que d'illustrer les différents algorithmes décrits et ne se prêtent donc pas à des comparaisons. Ce dernier point fait l'objet du chapitre 4.

L'un des objectifs permettant de comparer les différentes stratégies de commande est évidemment la consommation de carburant. Cette comparaison peut être réalisée en relatif, i.e. une stratégie par rapport à une autre, ou, ce qui semble plus pertinent, en comparaison avec une valeur minimale « absolue » de consommation, ce point fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 3.

Optimisation globale

3.1. Introduction	54
3.2. Formulation du problème d'optimisation	54
3.3. Optimisation basée sur l'algorithme du recuit simulé	56
3.3.1. Obtention d'une solution initiale	58
3.3.2. Perturbation d'une solution	59
3.3.3. Prise en compte de la contrainte égalité	59
3.3.4. Loi d'évolution de la température	60
3.3.5. Résultats	61
3.3.6. Conclusion	63
3.4. Programmation dynamique	64
3.4.1. Principe	64
3.4.2. Conclusion	66
3.5. Algorithme d'optimisation basé sur la théorie de la commande optimale	66
3.5.1. Algorithme de base /Delprat & al. 2001/	67
3.5.1.1. Résolution du problème réduit	69
3.5.1.2. Problème complet	74
3.5.1.3. Influence de $\lambda(0)$	76
3.5.1.4. Limitations de l'algorithme	80
3.5.1.5. Résultats	81
3.5.1.5.1. Modèle simplifié	81
3.5.1.5.2. Modèle complet	83
3.5.2. Améliorations de l'algorithme de base	84
3.5.2.1. Intégration du rendement de la batterie dans le problème d'optimisation /Delprat & al. 2001/	84
3.5.2.1.1. Formulation du problème	85
3.5.2.1.2. Résolution du problème d'optimisation globale	87
3.5.2.1.3. Algorithme	90
3.5.2.1.4. Résultats (sur le modèle complet)	91
3.5.2.2. Intégration de l'état du moteur thermique dans l'algorithme d'optimisation globale	93
3.6. Conclusion	98

3.1. Introduction

Sur un cycle de vitesse connu à l'avance, en simulation, on peut envisager l'utilisation d'algorithmes d'optimisation globale permettant le calcul, à chaque instant, de la meilleure répartition de puissance entre les deux motorisations. Sous réserve des hypothèses faites, les résultats sont forcément meilleurs que ceux obtenus avec les stratégies de commande temps réel. Néanmoins, la nécessité de connaître le cycle à l'avance ne permet pas d'envisager leur utilisation en temps réel. Les deux intérêts principaux de ce type de méthode sont d'obtenir, en premier lieu, des consommations de carburant servant de référence pour l'évaluation des résultats des stratégies de commande temps réel, en second lieu, de pouvoir éventuellement valider les principes mis en œuvre pour l'élaboration d'une stratégie de commande.

Le premier algorithme d'optimisation globale testé a été le recuit simulé /Delprat & al. 1999/. D'autres algorithmes basés sur les principes de programmation dynamique ont également été proposés pour cette application, par exemple, /Brahma & al. 2000/, /Rimaux & al. 1999/ /Zhang & Chen 2001/. Les temps de calculs prohibitifs de ces approches nous ont conduit à proposer une autre approche basée sur la théorie de la commande optimale.

En fonction des hypothèses faites (modèles de batterie, variables de décisions considérées), plusieurs algorithmes sont proposés dans la dernière partie, permettant de concilier temps de calcul et qualité de la solution.

3.2. Formulation du problème d'optimisation

Les algorithmes sont présentés pour le cas particulier du Berlingo hybride, mais la problématique générale est applicable, moyennant quelques modifications à d'autres architectures hybrides parallèles à addition de couples. Les deux principales relations mécaniques du Berlingo hybride sont :

Relation sur les couples :

$$C_r(t) = R(k(t)) \cdot (\rho \cdot C_e(t) \cdot \eta_{red} + C_{th}(t)) \cdot \eta_{bv} \quad (3.1)$$

Relation sur les régimes :

$$\omega_r(t) = \frac{\omega_{th}(t)}{R(k(t))} = \frac{\omega_e(t)}{R(k(t)) \cdot \rho} \quad (3.2)$$

$\omega_r(t)$ et $C_r(t)$ étant connus, les seuls degrés de liberté sont le choix du rapport de boîte $k(t)$ et un des couples : $C_e(t)$ ou $C_{th}(t)$.

$C(\omega_{th}(t), C_{th}(t))$ représente la consommation de carburant du moteur thermique, exprimée en g/s, nécessaire pour fournir le couple du moteur thermique $C_{th}(t)$ au régime du moteur thermique $\omega_{th}(t)$, la consommation de carburant sur la totalité du parcours s'écrit :

$$J = \sum_{t=0}^{N-1} C(\omega_{th}(t), C_{th}(t)) \cdot T_e \quad (3.3)$$

où T_e est la période d'échantillonnage et N le nombre d'échantillons sur un cycle donné. La problématique des stratégies de commande peut s'écrire sous la forme d'un problème d'optimisation sous contraintes :

$$\min_{C_{th}(t), k(t)} \sum_{t=0}^{N-1} C(\omega_{th}(t), C_{th}(t)) \cdot T_e \quad (3.4)$$

Sous les contraintes mécaniques : $0 < \omega_e(t) < \omega_{e_max} = \omega_{th_max} \cdot \rho$

$$\omega_{th_min} < \omega_{th}(t) < \omega_{th_max}$$

$$C_{e_min}(\omega_e(t)) < C_e(t) < C_{e_max}(\omega_e(t))$$

$$0 < C_{th}(t) < C_{th_max}(\omega_{th}(t))$$

Ce problème admet une solution : $C_{th}(t) = 0 \quad \forall t \in [0, N-1]$, qui correspond au mode *électrique pur*. Il assure le minimum de consommation de carburant mais conduit à la décharge complète de la batterie. Ce phénomène a déjà été explicité lors du chapitre précédent. Il est nécessaire de prendre en compte la deuxième source d'énergie, cela peut être réalisé en introduisant une contrainte sur l'état de charge de la batterie, exprimée de la manière suivante :

$$\sum_{t=0}^{N-1} P_{elec}(\omega_e(t), C_e(t)) \cdot T_e = \Delta Soc \quad (3.5)$$

$P_{elec}(\omega_e, C_e)$ représente la puissance prélevée sur la batterie par le moteur électrique pour produire le couple électrique C_e au régime ω_e , et ΔSoc la variation globale d'état de charge sur le cycle, c'est à dire l'énergie électrique consommée.

Si on choisit $\Delta Soc = 0$, la propulsion est globalement assurée par l'énergie issue de l'essence. La batterie est utilisée uniquement en tant que réservoir temporaire d'énergie afin de diminuer la consommation de carburant.

Le problème d'optimisation complet s'écrit donc :

$$\min_{C_{th}, C_e, k} \sum_{t=0}^{N-1} C(\omega_{th}(t), C_{th}(t)) \cdot T_e \quad (3.6)$$

$$SC: \quad 0 < \omega_e(t) < \omega_{mth_max} \cdot \rho$$

$$C_{e_min}(\omega_e(t)) < C_e(t) < C_{e_max}(\omega_e(t))$$

$$\omega_{th_min} < \omega_{th}(t) < \omega_{th_max}$$

$$0 < C_{th}(t) < C_{th_max}(\omega_{th}(t))$$

$$\sum_{t=0}^{N-1} P_{elec}(\omega_e(t), C_e(t)) \cdot T_e = \Delta Soc$$

Une première façon de résoudre ce problème est d'utiliser une méthode heuristique.

3.3. Optimisation basée sur l'algorithme du recuit simulé

Le recuit simulé est un algorithme d'optimisation globale pouvant être utilisé sur des problèmes de taille importante. Cet algorithme a été appliqué avec succès à une grande variété de problèmes et de nombreuses variations et améliorations sont disponibles dans la littérature /Ingber 1989/.

Brièvement l'algorithme consiste, à partir d'une solution initiale, à générer aléatoirement à chaque itération, une nouvelle solution dans le voisinage de la précédente. Les solutions

généérées qui sont moins performantes au sens du critère sont acceptées avec une probabilité donnée par la formule de Boltzmann afin de pouvoir ressortir d'un minimum local.

A chaque instant t , les variables de décisions sont le couple du moteur électrique $C_e(t)$ et le numéro de rapport de boîte de vitesses $k(t)$. Le couple du moteur thermique $C_{th}(t)$ est déduit de la relation sur les couples (1.2). Une solution au problème d'optimisation (3.6) est une matrice X :

$$X = \begin{bmatrix} C_{th}(0) & k(0) \\ \vdots & \vdots \\ C_{th}(N-1) & k(N-1) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

L'espace des solutions, pour le Berlingo prototype, est donc $2 \cdot \mathfrak{R}^N$, N étant de l'ordre de 10^3 .

La figure 31 présente l'algorithme général du recuit simulé avec cycles de réchauffement /Bonnemoy & Hamma 1991/.

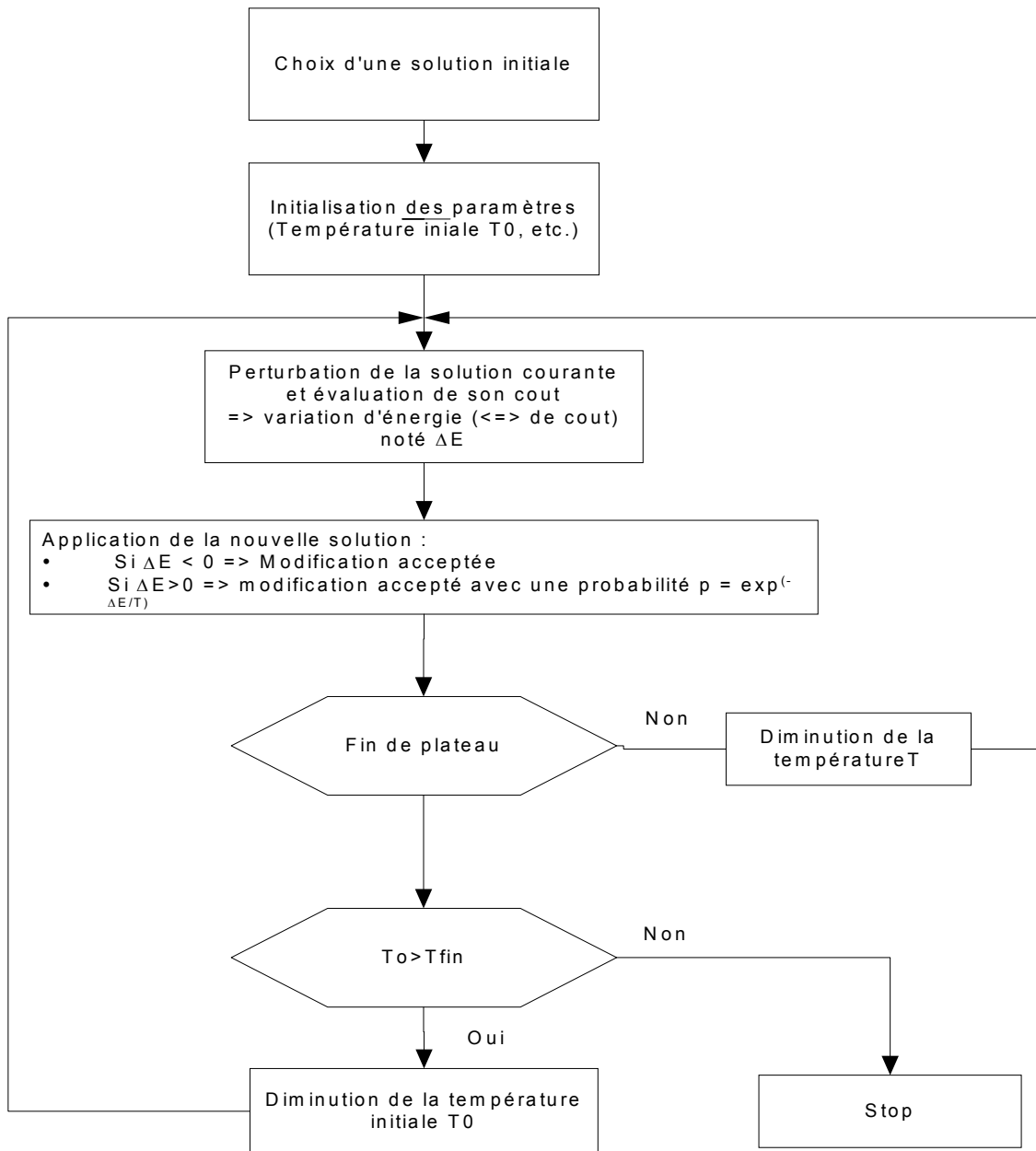


Figure 31 : Algorithme du recuit simulé avec cycles de réchauffement /Bonnemoy & Hamma 1991/

3.3.1. Obtention d'une solution initiale

L'algorithme du recuit simulé nécessite une solution initiale admissible. Il est possible de générer aléatoirement des valeurs pour les couples et les rapports de boîte qui respectent les contraintes mécaniques. Cependant, les solutions ainsi obtenues ne respectent pas la contrainte (3.5) sur l'état de charge. Un recuit simulé secondaire est donc utilisé pour ramener l'état de charge final à la valeur désirée, sans se préoccuper de la consommation de carburant /Delprat 1999/.

3.3.2. Perturbation d'une solution

Les matrices solutions du problème (3.6) contiennent des valeurs réelles pour le couple du moteur thermique et entières pour les numéros de rapport de boîte. La perturbation des numéros de rapport de boîte génère systématiquement des solutions situées en dehors du voisinage de la solution précédente et donc rejetées par l'algorithme.

Un changement de variable permet de remédier à ce problème. Pour cela on considère le couple délivré par le moteur électrique vu depuis les roues, figure 32 :

$$RC_e(t) = C_e(t) \cdot R(k) \cdot \rho \cdot \eta_{bv} \cdot \eta_{red} \quad (3.8)$$

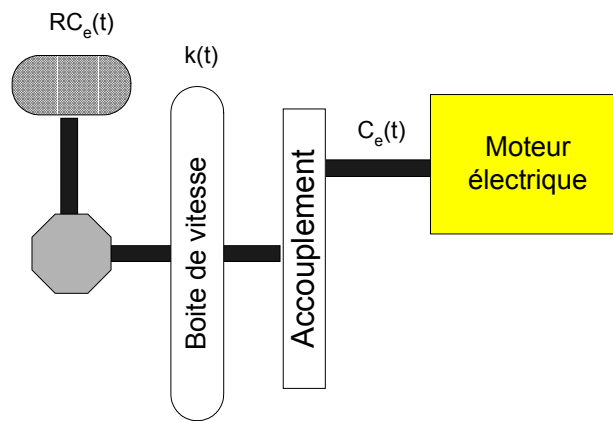


Figure 32 : Couple fourni par le moteur électrique vue des roues

Le nouveau vecteur solution s'écrit $Y = \begin{Bmatrix} RC_e(0) \\ \vdots \\ RC_e(N-1) \end{Bmatrix}$. La perturbation d'un vecteur solution

se fait alors simplement : $Y' = Y + \Delta Y$ avec ΔY vecteur de N valeurs aléatoires. À chaque instant, la plus grande valeur admissible de $k(t)$ est choisie. Ceci assure la minimisation des pertes dans la chaîne de traction. Chaque couple $C_e(t)$ est ensuite calculé en utilisant la

relation suivante :
$$C_e(t) = \frac{RC_e(t)}{R(k(t)) \cdot \rho \cdot \eta_{bv} \cdot \eta_{red}}$$

3.3.3. Prise en compte de la contrainte égalité

Dans la majorité des cas, la solution générée aléatoirement ne respecte pas la contrainte (3.5) sur l'état de charge. Un algorithme itératif vient donc modifier le vecteur solution afin de corriger l'état de charge final.

Cet algorithme est basé sur la relation approximative $P_{batt}(C_e, \omega_e) \approx C_e \cdot \omega_e$. L'idée est de répartir uniformément sur le vecteur solution la quantité d'énergie consommée en trop à la fin du cycle. L'algorithme est donc le suivant :

1. Calculer $\varepsilon_{\Delta Soc}$ écart sur la variation de l'état de charge voulue sur un cycle et celle effectivement obtenue :
$$\varepsilon_{\Delta Soc} = \sum_{t=0}^{N-1} P_{batt}(C_e(t), \omega_e(t)) \cdot T_e - \Delta Soc_{cons}$$
.
2. Si $|\varepsilon_{\Delta Soc}| > Seuil$ alors estimer pour chaque point t du cycle la correction à apporter au couple du moteur électrique : $\Delta C_e(t) = \frac{\varepsilon_{\Delta Soc}}{\omega_e(t) \cdot N}$. Calculer la nouvelle valeur de chaque couple du moteur électrique tout au long du cycle : $C_e(t) = C_e(t) + \Delta C_e(t)$. Aller à l'étape 1.

Généralement deux à trois itérations suffisent pour assurer la convergence de l'algorithme.

3.3.4. Loi d'évolution de la température

La loi d'évolution de la température est un point crucial de réglage de l'algorithme. Trop rapide elle ne permet pas de bien explorer l'espace des solutions, et l'algorithme peut se « bloquer » dans un minimum local, trop lente, la vitesse de convergence peut rapidement devenir prohibitive. Dans notre cas, après plusieurs essais, la température a été choisie comme une double loi exponentielle de la forme :

$$T_{i,n} = T_0 \cdot \alpha^{i-1} \cdot \beta^{n-1} \quad \text{avec}$$

T_0	:	Température initiale
$\alpha \in [0,1]$:	Coefficient de refroidissement
$\beta \in [0,1]$:	Coefficient de réchauffement
i	:	Numéro de plateau
n	:	Numéro de refroidissement

La valeur de la température n'est changée que lorsque le critère de fin de plateau est vérifié. Il s'exprime de la manière suivante :

- Le nombre d'itérations depuis la dernière amélioration de la meilleure solution obtenue a atteint une valeur limite N_1 .
- Le nombre d'itérations sans amélioration de la valeur du critère a atteint une valeur limite N_2 .

3.3.5. Résultats

Il est clair que les réglages des paramètres du recuit simulé influencent énormément ses performances, le dilemme étant de choisir entre la durée de calcul et la 'qualité' des solutions obtenues. Les compromis suivants ont été fait :

$$T_0 = 0,05, T_f = 0,001, \alpha = 0,9, \beta = 0,7, N_1 = 50000, N_2 = 10000.$$

Les résultats sont donnés pour le Cycle Européen Normalisé, figure 33, avec une période d'échantillonnage de $T_e = 1s$. Les résultats sont donnés pour le Berlingo hybride.

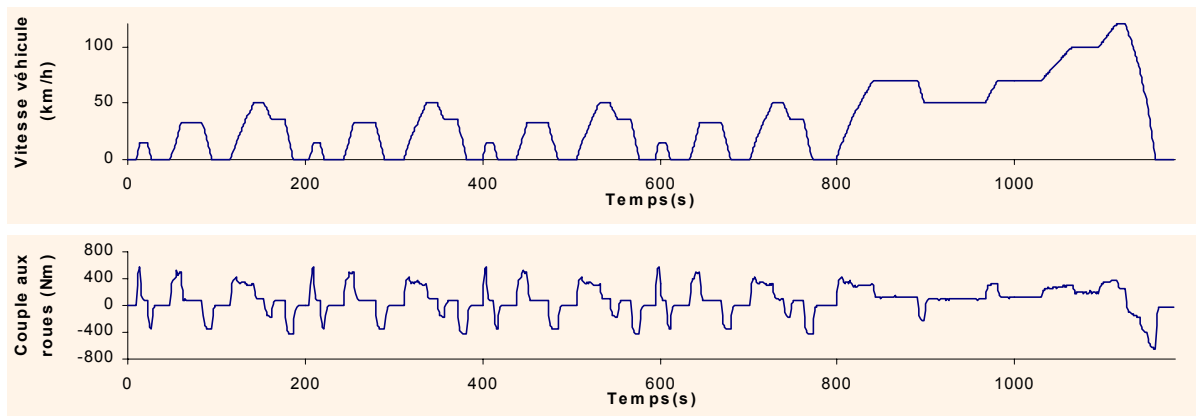


Figure 33 : Le Cycle Européen Normalisé

L'évolution de la consommation de carburant sur le cycle CEN en fonction des itérations de l'algorithme est présentée figure 34. L'algorithme fournit la répartition de couple entre les deux moteurs et le numéro de rapport de boîte à utiliser.

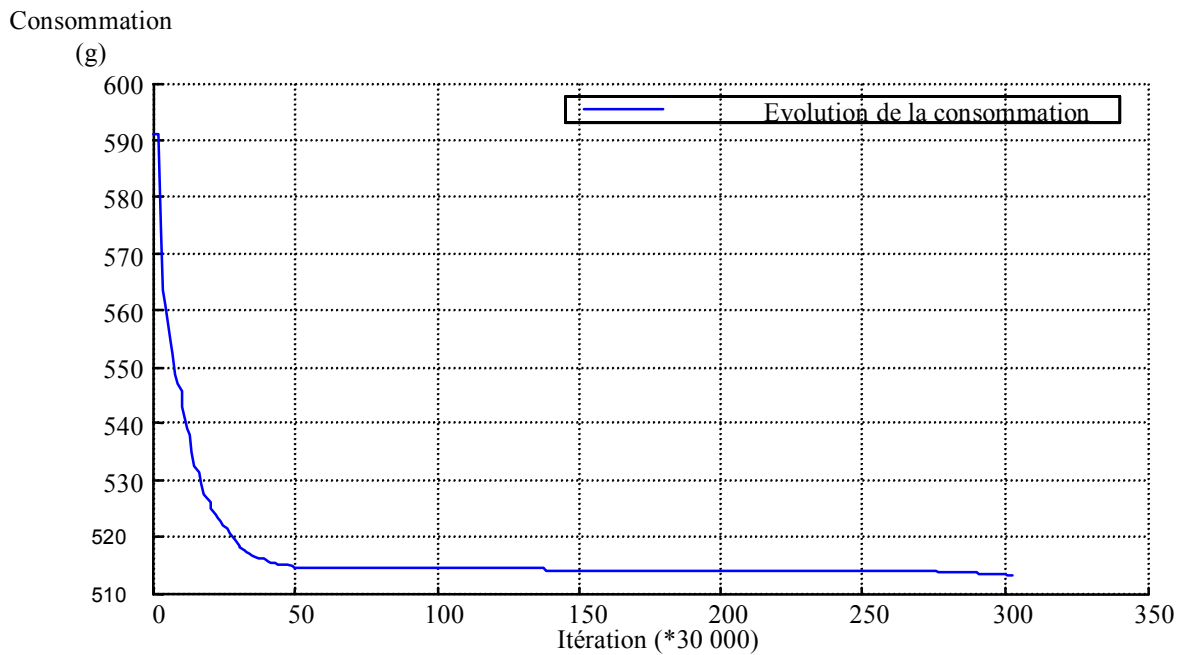


Figure 34 : Évolution de la consommation en fonction des itérations de l'algorithme du recuit simulé

La consommation de carburant correspondante est de $6,27\text{ l}/100\text{ km}$, avec une variation globale de l'état de charge nulle $\Delta Soc_{cons} = 0$, figure 35. Le gain, par rapport au véhicule conventionnel, est de 20% malgré un excédent de poids de 300kg /Delprat & al. 1999/.

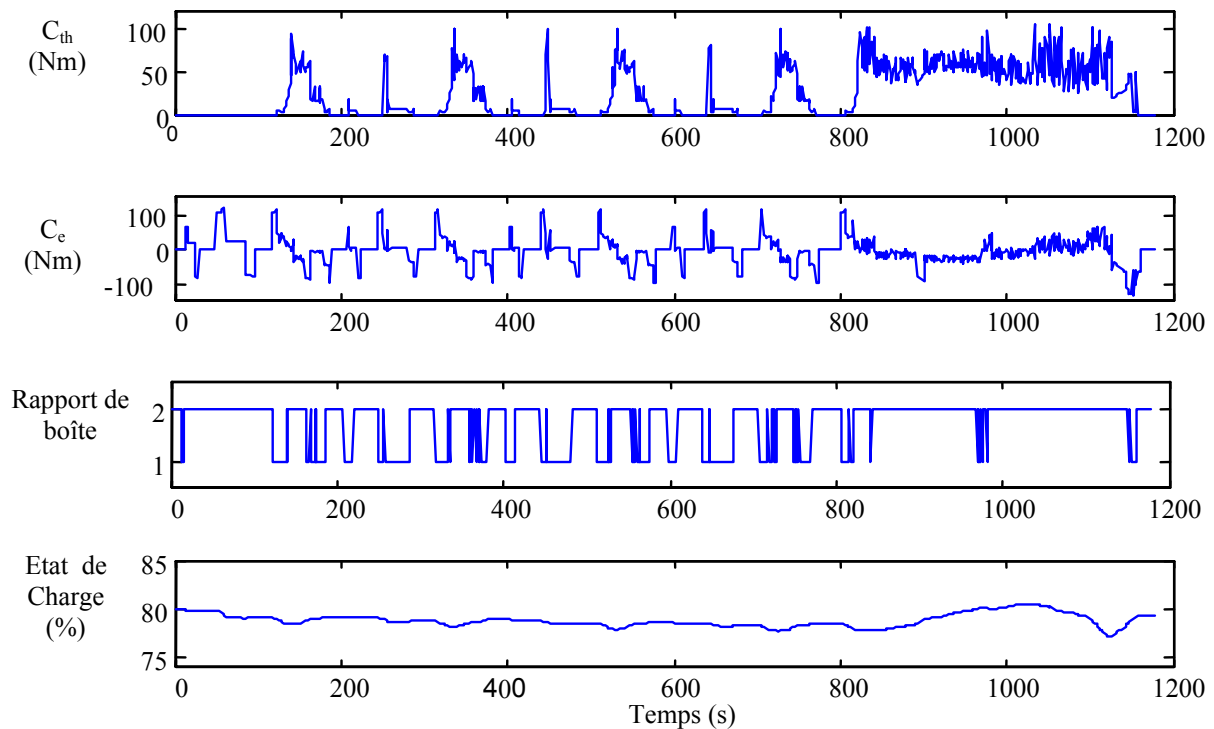


Figure 35 : Solution fournie par le recuit simulé

Comme le montre la figure 35, les solutions obtenues sont fortement ‘bruitées’ en raison de la nature stochastique du recuit.

Afin de prendre en compte, de manière globale, l’utilisation simultanée des deux sources d’énergie, il est intéressant de représenter la consommation de carburant en fonction de la variation globale de l’état de charge /Smokers & al 1999/. Le programme du recuit simulé est exécuté pour différentes valeurs de ΔSoc . Cependant, le nombre de solutions à calculer étant important, le paramétrage du recuit simulé a été modifié de manière à réduire les temps de calculs, mais cela dégrade ses performances. Le paramétrage est le suivant :

$$T_0 = 0,05, T_f = 0,001, \alpha = 0,9, \beta = 0,7, N_1 = 20000, N_2 = 2500.$$

Comme on pouvait s’y attendre, le fait de dégrader les critères aboutit à des résultats moins bons que ceux obtenus avec le réglage précédent, figure 36. Par exemple, pour $\Delta Soc = 0\%$, la consommation de carburant atteint les $6,8 l/100km$.

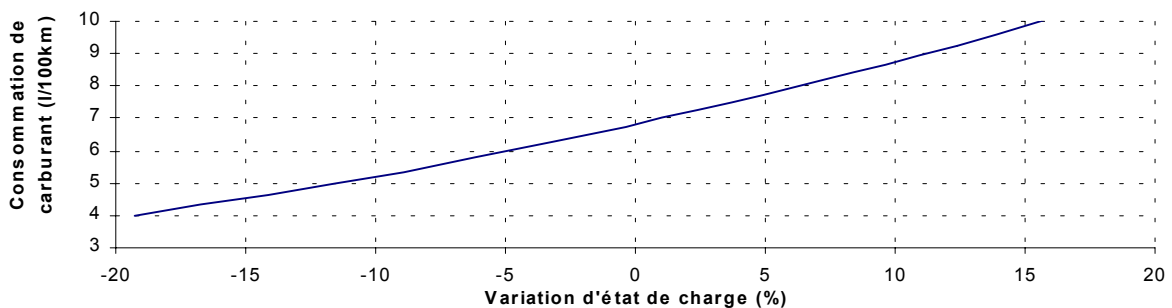


Figure 36 : Consommation de carburant en fonction de la variation d'état de charge

3.3.6. Conclusion

Le premier essai d’optimisation globale a été réalisé à l’aide de l’algorithme du recuit simulé avec cycles de réchauffement. Les résultats obtenus permettent d’améliorer, en terme de consommation de carburant, ceux des stratégies de commande temps réel. Néanmoins, cet algorithme présente les défauts suivants :

- les temps de calculs sont extrêmement longs (plusieurs heures sur Pentium II 233Mhz pour une solution)
- l’algorithme est très sensible au réglage des paramètres

Une deuxième approche est envisageable basée sur la programmation dynamique.

3.4. Programmation dynamique

Les principes de programmation dynamique ont été utilisés pour de nombreuses architectures de véhicules hybrides : combinée /Zhang & Chen 2001/, série /Brahma & al. 2000/, double arbre /Lin & al. 2001/ / Rimaux & al. 1999/.

3.4.1. Principe

La batterie est considérée comme un système dynamique :

$$x(t+1) = x(t) + P_{elec}(C_e(t), \omega_e(t)) \cdot T_e \quad (3.9)$$

(3.9) peut aussi s'écrire :

$$x(t) = x(t+1) - P_{elec}(C_e(t), \omega_e(t)) \cdot T_e \quad (3.10)$$

Pour un cycle de vitesse donné, l'état de charge de la batterie $x(t)$ est borné par deux courbes, $x_{\min}(t)$ et $x_{\max}(t)$, figure 37.

Soit $x'_{\max}(t)$ l'état de charge obtenu avec (3.9) en appliquant le couple maximal du moteur thermique, depuis le point $(t=0, x(0) = x_{init})$.

Soit $x''_{\max}(t)$ l'état de charge obtenu avec (3.10) en appliquant le couple minimal du moteur thermique, depuis le point $(t=N, x(N) = x_{init} + \Delta Soc)$.

On a alors $x_{\max}(t) = \min(x'_{\max}(t), x''_{\max}(t))$, la courbe $x_{\min}(t)$ est obtenue de manière similaire.

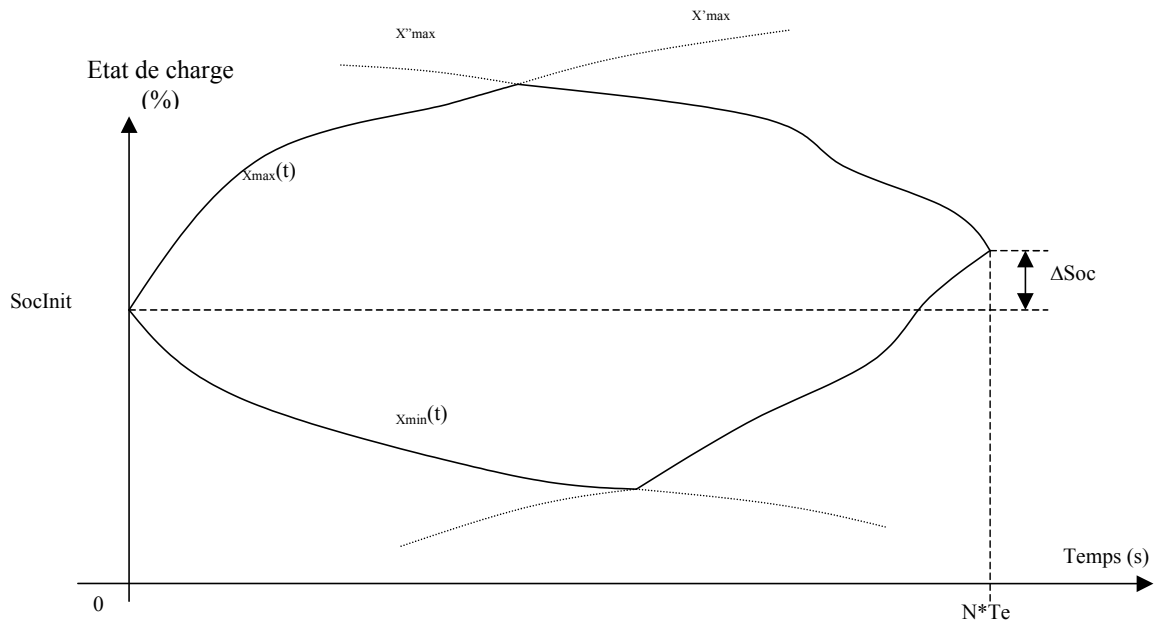


Figure 37 : Limite de variations de l'état de charge

Afin de pouvoir appliquer les principes de la programmation dynamique, on considère l'état de charge comme une variable discrète appartenant à un ensemble fini de valeurs, i.e. $x(t) \in \{x_1(t), \dots, x_n(t)\}$.

Soit $S(t, x_j(t))$ le coût minimum associé au passage de $(N, x_{visé} + \Delta Soc)$ à $(t, x_j(t))$, figure 38. Avec $D_{j \rightarrow i}(t)$ la consommation de carburant permettant de passer du point $(t, x_j(t))$ au point $(t-1, x_i(t-1))$, la relation de récurrence permettant de calculer $S(t-1, x_i(t-1))$ est donnée par :

$$S(t-1, x_i(t-1)) = \min_j (S(t, x_j(t)) + D_{j \rightarrow i}(t)) \quad (3.11)$$

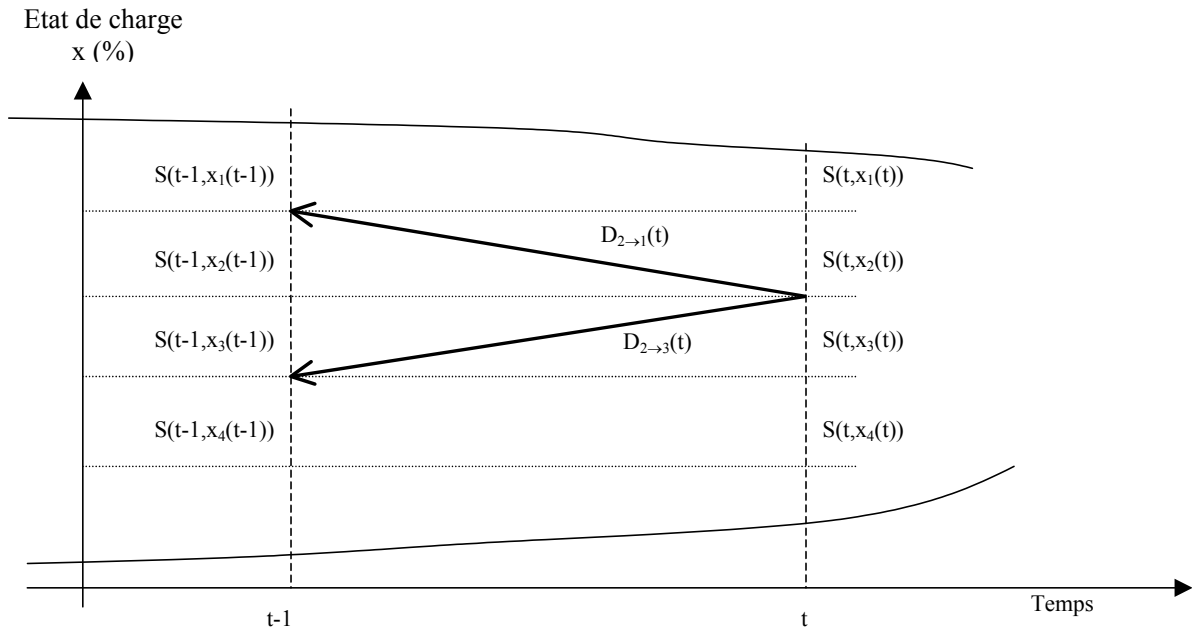


Figure 38 : Principe de la programmation dynamique

Ainsi de proche en proche, on peut calculer la consommation de carburant minimale pour un cycle de vitesse donné.

3.4.2. Conclusion

La programmation dynamique permet de calculer, sous certaines hypothèses (modèles utilisés, etc.), la commande optimale minimisant la consommation de carburant. L'inconvénient majeur de ce type d'approche est que, pour le pas de calcul et la durée des cycles considérés pour notre application, les temps de calculs pour les algorithmes proposés sont prohibitifs.

Néanmoins, la formulation du problème proposée peut être exploitée par d'autres outils, tels que la théorie de la commande optimale.

3.5. Algorithme d'optimisation basé sur la théorie de la commande optimale

Dans cette partie, le couple du moteur thermique $C_{th}(t)$ sera une variable de décision, celui du moteur électrique, $C_e(t)$ étant imposé par la relation (1.2). Tous les algorithmes seront donc écrits en fonction des variables de décision : $C_{th}(t)$ et $k(t)$.

3.5.1. Algorithme de base /Delprat & al. 2001/

La batterie est considérée comme un système dynamique :

$$x(t+1) = x(t) + P_e(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e \quad (3.12)$$

$$\text{Avec } P_{e_th}(C_{th}(t), k(t)) = P_e \left(\frac{\frac{C_r(t)}{R(k(t)) \cdot \eta_{bv}} - C_{th}(t)}{\rho \cdot \eta_{red}}, \frac{\omega_r(t)}{R(k(t)) \cdot \rho} \right) \quad (3.13)$$

$P_{e_th}(C_{th}(t), k(t))$ représente la puissance développée par le moteur électrique lorsque le moteur thermique délivre le couple $C_{th}(t)$ et que le numéro de rapport de boîte $k(t)$ est sélectionné.

Le critère considéré est la consommation de carburant sur la totalité du parcours :

$$J = \sum_{t=0}^{N-1} D(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e \quad (3.14)$$

$$\text{avec } D(C_{th}(t), k(t)) = C \left(C_{th}(t), \frac{\omega_r(t)}{k(t)} \right) \quad (3.15)$$

Enfin, les contraintes mécaniques peuvent être réécrites en fonction des variables de décisions.

- Contrainte sur l'état de charge :

$$x(N) = x(0) + \Delta Soc \quad (3.16)$$

- Contrainte sur le couple du moteur thermique

$C_r(t)$ étant connu, le couple du moteur thermique est restreint par (1.7) mais aussi par la contrainte (1.5) du couple du moteur électrique :

$$C'_{th_min}(k(t)) = \max \left\{ C_{th_min}(\omega_e(t)), \frac{C_r(t)}{R(k(t))} - \rho \cdot \eta_e \cdot C_{e_max}(\omega_e(t)) \right\}$$

$$C'_{th_max}(k(t)) = \min \left\{ C_{th_max}(\omega_{th}(t)), \frac{C_r(t)}{R(k(t))} - \rho \cdot \eta_e \cdot C_{e_min}(\omega_e(t)) \right\}$$

$$C'_{th_min}(k(t)) \leq C_{th}(t) \leq C'_{th_max}(k(t)) \quad (3.17)$$

Lorsque le couple demandé aux roues est trop important pour être produit par le moteur électrique seul, la borne $C'_{th_min}(k(t))$ impose un couple minimal sur le moteur thermique. La borne $C'_{th_max}(k(t))$ permet d'éviter que la consigne de couple du moteur électrique ne devienne inférieure au couple minimal qu'il peut développer.

- Numéro de rapport de boîte de vitesses

A chaque instant t , le numéro de rapport de boîte de vitesses est restreint par les contraintes **(1.4)-(1.7)**. Soit $K(t) \in \{\{1\}\{2\}\{1,2\}\}$ l'ensemble des valeurs admissibles pour $k(t)$. Cette contrainte permet d'éviter les sur régimes sur chacun des deux moteurs.

Le problème d'optimisation globale, où n'apparaissent que les variables de décisions, est donc :

$$\text{Système :} \quad x(t+1) = x(t) + P_{e_th}(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e \quad (3.18)$$

$$\text{Critère :} \quad J = \sum_{t=0}^{N-1} D(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e$$

$$\text{Contraintes mécaniques :} \quad C'_{th_min}(k(t)) \leq C_{th}(t) \leq C'_{th_max}(k(t))$$

$$k(t) \in K(t)$$

$$\text{Contrainte sur l'état de charge :} \quad x(N) = x(0) + \Delta Soc$$

Une solution au problème d'optimisation globale est donc la matrice X , comme pour la programmation dynamique, contenant pour chaque instant $t \in [0..N-1]$ le couple du moteur thermique et le numéro de rapport de boîte :

$$Z = \begin{bmatrix} C_{th}(0) & k(0) \\ \vdots & \vdots \\ C_{th}(N-1) & k(N-1) \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Avant de traiter le problème d'optimisation complet, un problème réduit sans la contrainte (3.17) est étudié.

3.5.1.1. Résolution du problème réduit

Sans la contrainte inégalitaire (3.17), le problème (3.18) revient à minimiser le critère suivant, $\lambda(t)$ représentant un paramètre de Lagrange /Borne & al. 1999/.

$$J' = \sum_{t=0}^{N-1} \left\{ D(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e + \lambda(t) \cdot (x(t+1) - x(t) - P_{e_th}(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e) \right\} \quad (3.20)$$

Les conditions d'optimalité sont données par les dérivées partielles de J' , $\forall t \in \{0 \dots N-1\}, \forall k \in \mathbf{K}(t)$:

$$\frac{\partial J'}{\partial \lambda(t)} = 0 \Leftrightarrow x(t+1) - x(t) - P_{e_th}(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e = 0 \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial J'}{\partial x(t)} = 0 \Leftrightarrow \lambda(t-1) - \lambda(t) = 0 \Leftrightarrow \lambda(t) = \lambda(0) \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial J'}{\partial C_{th}(t)} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial D(C_{th}(t), k(t))}{\partial C_{th}(t)} - \lambda(t) \cdot \frac{\partial P_{e_th}(C_{th}(t), k(t))}{\partial C_{th}(t)} = 0 \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial^2 J'}{\partial C_{th}(t)^2} \geq 0 \Leftrightarrow \frac{\partial^2 D(C_{th}(t), k(t))}{\partial C_{th}(t)^2} - \lambda(t) \cdot \frac{\partial^2 P_{e_th}(C_{th}(t), k(t))}{\partial C_{th}(t)^2} \geq 0 \quad (3.24)$$

$P_{elec}(C_e(t), \omega_e(t))$ et $C(C_{th}(t), \omega_{th}(t))$ sont généralement données par des cartographies, *figure 39* et une expression analytique de $\frac{\partial P_{elec}(\omega_e(t), C_e(t))}{\partial C_e(t)}$ et de $\frac{\partial C(\omega_{th}(t), C_{th}(t))}{\partial C_{th}(t)}$

$\forall k(t) \in \mathbf{K}(t), \forall t \in [0..N-1]$ est nécessaire à la résolution de l'équation (3.23).

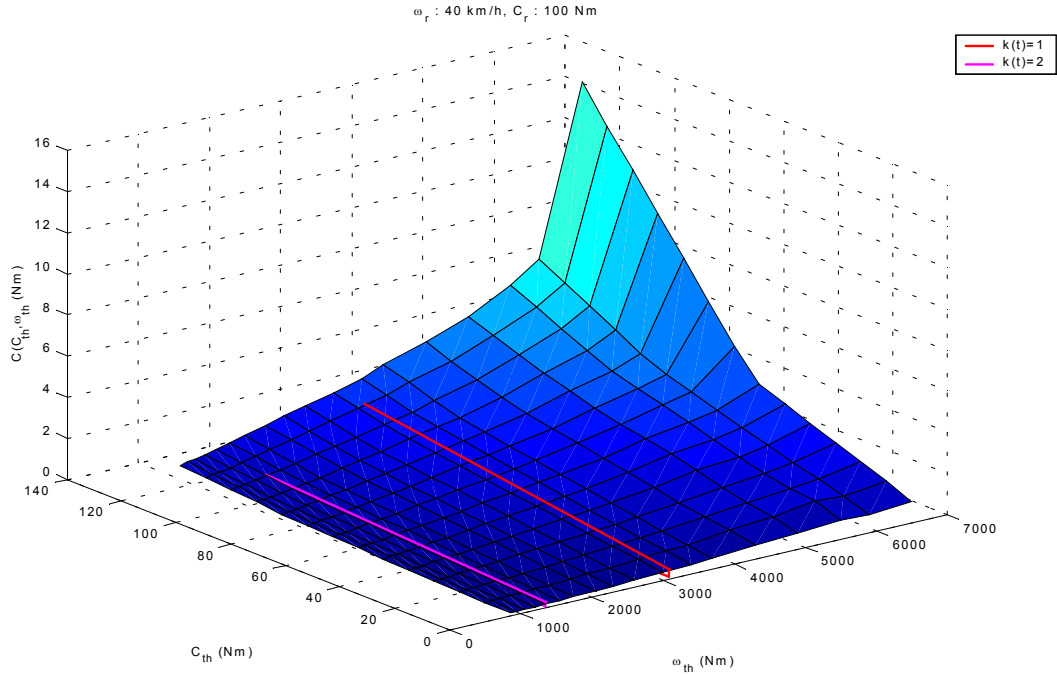


Figure 39 : Cartographie de la consommation de carburant

A chaque instant d'échantillonnage, $\omega_{th}(t)$ et $\omega_e(t)$ sont connus grâce à l'équation (1.3). Pour chaque numéro de rapport de boîte de vitesses admissible, $D(C_{th}(t), k(t))$ représente donc une coupe de la cartographie $C(C_{th}(t), \omega_{th}(t))$ par le plan $\omega_{th}(t) = \frac{\omega_r(t)}{R(k(t))}$, figure 39. Les courbes $D(C_{th}(t), k(t))$ peuvent être approchées par des morceaux de paraboles. Soit n le nombre de paraboles, chacune étant définie sur un segment $[C_{th_min}^i, C_{th_max}^i]$ $i \in \{0, \dots, n-1\}$, avec bien sûr $C_{th_min}^0 = C'_{th_min}(k(t))$ et $C_{th_max}^{n-1} = C'_{th_max}(k(t))$, on obtient, figure 40 :

$$D(C_{th}(t), k(t)) \simeq \frac{a_{th}^i(k(t))}{2} \cdot C_{th}(t)^2 + b_{th}^i(k(t)) \cdot C_{th}(t) + c_{th}^i(k(t)) \quad (3.25)$$

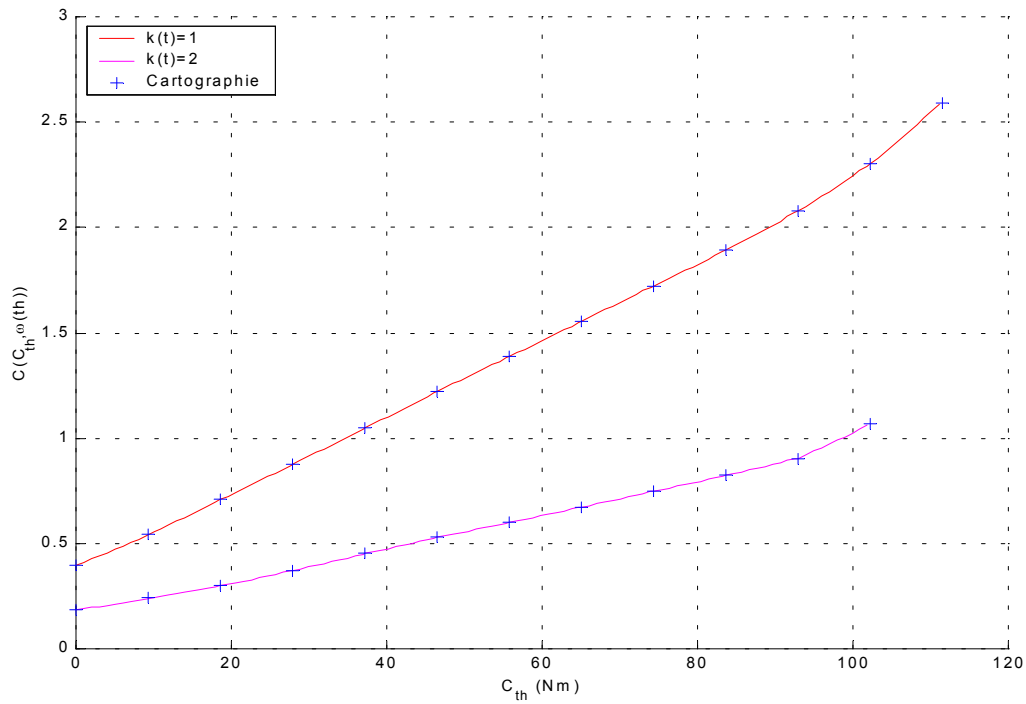


Figure 40 : Exemple d'approximation de la consommation de carburant par morceaux de paraboles

Des modèles linéaires par morceaux sont donc obtenus pour $\frac{\partial C(D_{th}(t), k(t))}{\partial C_{th}(t)}$ figure 41 :

$$\frac{\partial D(k(t), C_{th}(t))}{\partial C_{th}(t)} \approx a_{th}^i(k(t)) \cdot C_{th}(t) + b_{th}^i(k(t)) \quad (3.26)$$

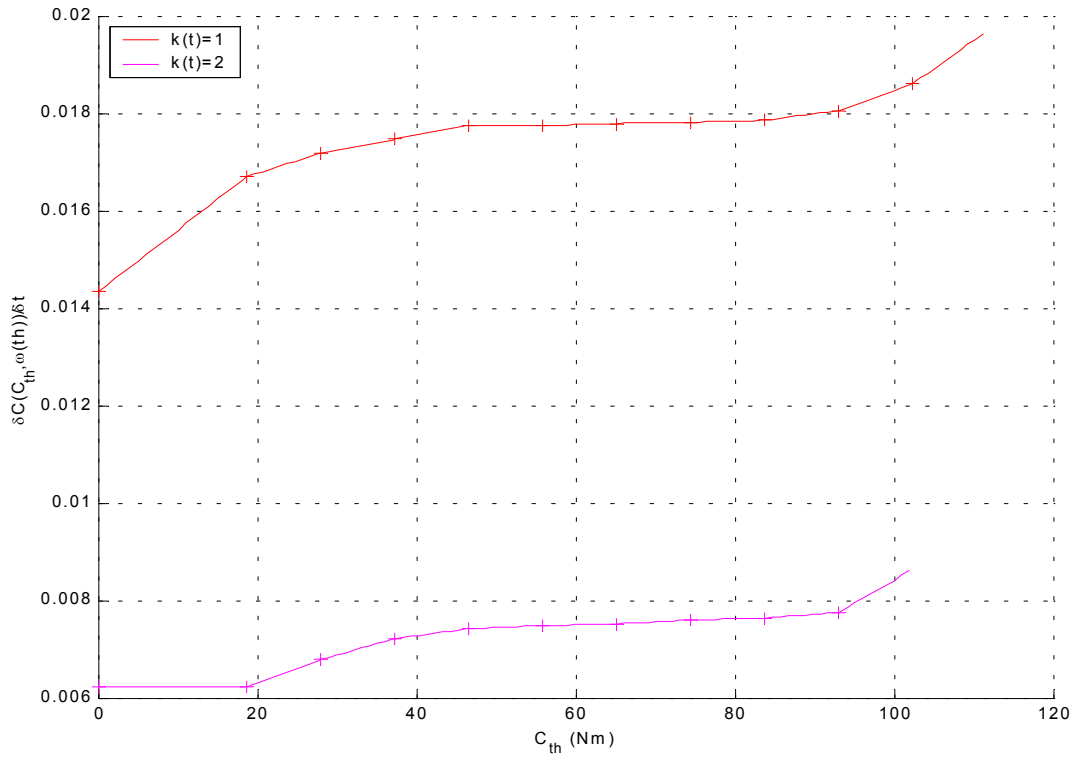


Figure 41 : Approximation de la dérivée de la consommation par morceaux

De la même manière pour le moteur électrique, on obtient :

$$P_{elec}(C_e(t), \omega_e(t)) \approx \frac{\alpha_e^i(k(t))}{2} \cdot C_e(t)^2 + \beta_e^i(k(t)) \cdot C_e(t) + \delta_e^i(k(t)) \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial P_{elec}(C_e(t), \omega_e(t))}{\partial C_e(t)} \approx \alpha_e^i(k(t)) \cdot C_e(t) + \beta_e^i(k(t)) \quad (3.28)$$

L'équation $C_e(t) = \left(\frac{C_r(t)}{\eta_{gb} \cdot R(k(t))} - C_{th}(t) \right) \cdot \frac{1}{\rho \cdot \eta_e}$, permet de réécrire le résultat précédent

uniquement avec les variables de décision :

$$P_{e_th}(C_{th}(t), k(t)) \approx a_e^i(k(t)) \cdot C_{th}(t)^2 + b_e^i(k(t)) \cdot C_{th}(t) + c_e^i(k(t)) \quad (3.29)$$

avec :

$$a_e^i(k(t)) = \frac{\alpha_e^i(k(t))}{2 \cdot (\rho \cdot \eta_e)^2}$$

$$b_e^i(k(t)) = -\frac{C_r(t) \cdot \alpha_e^i(k(t))}{\eta_{gb} \cdot R(k(t))} \cdot \frac{1}{\rho \cdot \eta_e} - \frac{\beta_e^i(k(t))}{\rho \cdot \eta_e}$$

$$c_e^i(k(t)) = \delta_e^i(k(t)) + \frac{C_r(t)}{\rho \cdot \eta_e \cdot \eta_{gb} \cdot R(k(t))} \cdot \left(\beta_e^i(k(t)) + \frac{\alpha_e^i(k(t)) \cdot C_r(t)}{2 \cdot \rho \cdot \eta_e \cdot \eta_{gb} \cdot R(k(t))} \right)$$

$$\frac{\partial P_{e_th}(C_{th}(t), k(t))}{\partial C_{th}(t)} \approx a_e^i(k(t)) \cdot C_{th}(t) + b_e^i(k(t)) \quad (3.30)$$

Si $\lambda(0)$ est connu, (3.26) et (3.30) permettent de résoudre (3.23). Soit $C_{th}^i(t)$ la solution obtenue pour le segment i , $i \in [0..n-1]$:

$$a_e^i(k(t)) \cdot C_{th}^i(t) + b_e^i(k(t)) - \lambda(0) \cdot (a_{th}^i(k(t)) \cdot C_{th}^i(t) + b_{th}^i(k(t))) = 0$$

$$\Leftrightarrow C_{th}^i(t) = \frac{\lambda(0) \cdot b_{th}^i(k(t)) - b_e^i(k(t))}{a_e^i(k(t)) - \lambda(0) \cdot a_{th}^i(k(t))} \quad (3.31)$$

Avec (3.26) et (3.30), la condition au second ordre (3.24) devient :

$$(3.24) \Leftrightarrow a_e^i(k(t)) - \lambda(0) \cdot a_{th}^i(k(t)) \geq 0 \quad (3.32)$$

Si $\lambda(0)$ est connu, à chaque instant t , l'ensemble des minimums de (3.20), noté $\Omega(t)$, est constitué des solutions de (3.23) telles que $C_{th}^i(t) \in [C_{th_min}^i, C_{th_max}^i]$ et $a_e^i(k(t)) - \lambda(0) \cdot a_{th}^i(k(t)) > 0$. $\Omega(t)$ peut être vide ou contenir plusieurs valeurs.

Pour éviter le cas $\Omega(t) = \emptyset$, la contrainte (3.17) doit être introduite dans le problème d'optimisation.

3.5.1.2. Problème complet

La contrainte (3.17) limitant le couple $C_{th}(t)$ étant réécrite sous la forme d'une contrainte égalitaire, elle peut être intégrée dans le critère (3.20). Soit $\Gamma(t) \in \mathbb{R}$ un paramètre, la contrainte égalitaire s'écrit, avec :

$$\begin{aligned} B(k(t)) &= C'_{th_max}(k(t)) - C'_{th_min}(k(t)), \text{ et} \\ A(k(t)) &= C'_{th_max}(k(t)) \cdot C'_{th_min}(k(t)) : \\ -C_{th}(t)^2 + C_{th}(t) \cdot B(k(t)) + A(k(t)) + \Gamma(t)^2 &= 0 \end{aligned} \quad (3.33)$$

La contrainte (3.33) est introduite dans le critère avec un paramètre de Lagrange $\gamma(t)$:

$$\begin{aligned} J'' = \sum_{t=0}^{N-1} \{ & D(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e + \lambda(t) \cdot (x(t+1) - x(t) - P_{e_th}(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e) \\ & + \gamma(t) \cdot (-C_{th}(t)^2 + C_{th}(t) \cdot B(k(t)) + A(k(t)) + \Gamma(t)^2) \} \end{aligned} \quad (3.34)$$

On obtient alors les conditions au premier et second ordre suivantes :

Conditions au premier ordre $\forall t \in [1..N], \forall k(t) \in K(t)$:

$$\frac{\partial J''}{\partial \lambda(t)} = 0 \Leftrightarrow x(t+1) - x(t) - P_{e_th}(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e = 0 \quad (3.35)$$

$$\frac{\partial J''}{\partial x(t)} = 0 \Leftrightarrow \lambda(t) = \lambda(0) \quad (3.36)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial J''}{\partial C_{th}(t)} = 0 \Leftrightarrow & \frac{\partial D(C_{th}(t), k(t))}{\partial C_{th}(t)} \cdot T_e - \lambda(t) \cdot \frac{\partial P_{e_th}(C_{th}(t), k(t))}{\partial C_{th}(t)} \cdot T_e \\ & + \gamma(t) \cdot (-2C_{th}(t) + B(k(t))) = 0 \end{aligned} \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial J''}{\partial \gamma(t)} = 0 \Leftrightarrow -C_{th}(t)^2 + C_{th}(t) \cdot B(k(t)) + A(k(t)) + \Gamma(t)^2 = 0 \quad (3.38)$$

$$\frac{\partial J''}{\partial \Gamma(t)} = 0 \Leftrightarrow 2 \cdot \Gamma(t) \cdot \lambda(t) = 0 \quad (3.39)$$

La condition (3.39) s'écrit aussi : $\Gamma(t) = 0$ (3.40)

ou $\gamma(t) = 0$ (3.41)

La condition au second ordre : $\forall t \in [1..N], \forall k(t) \in \mathbf{K}(t)$

$$\frac{\partial^2 J''}{\partial C_{th}(t)^2} \geq 0 \Leftrightarrow \frac{\partial^2 D(k(t), C_{th}(t))}{\partial C_{th}(t)^2} \cdot T_e - \lambda(t) \cdot \frac{\partial^2 P_{e-th}(k(t), C_{th}(t))}{\partial C_{th}(t)^2} \cdot T_e - 2 \cdot \gamma(t) \geq 0 \quad (3.42)$$

Contrainte sur l'état de charge : $x(N) = x(0) + \Delta Soc$ (3.43)

Si la condition (3.40) est vérifiée alors $C_{th}(t) \in \{C'_{th_min}(k(t)), C'_{th_max}(k(t))\}$. Si la condition (3.41) est vérifiée alors :

$$J'' = J' = \Delta Soc + \sum_{i=0}^{N-1} \{D(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e - \lambda(0) \cdot P(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e\} \quad (3.44)$$

Les conditions d'optimalité sont les mêmes que pour le problème réduit : (3.21)-(3.23) et (3.24).

Si $\lambda(0)$ est connu, le problème réduit étant résolu, la commande $(C_{th}^*(t), k^*(t))$ appliquée au groupe motopropulseur est choisie dans l'ensemble :

$$\Omega_{tot}(t) = \Omega(t) \cup \left\{ (C'_{th_min}(k(t)), k(t)), (C'_{th_max}(k(t)), k(t)) \right\}, \forall k(t) \in \mathbf{K}(t).$$

3.5.1.3. Influence de $\lambda(0)$

$\omega_r(t)$ et $C_r(t)$ étant connus $\forall t \in [0..N-1]$, les valeurs de $(C_{th}^*(t), k^*(t))$, et par conséquent l'état de charge final $x(N)$, ne dépendent que de la valeur de $\lambda(0)$.

On peut déduire depuis l'expression du critère (3.44) que le paramètre $\lambda(0)$ pondère l'influence de la puissance consommée par le moteur électrique par rapport à la consommation de carburant. Ce point est illustré par les trois cas suivants.

- Cas $\lambda(0) = 0$

Dans ce cas, le critère minimisé est la consommation de carburant seule :

$$J' = \Delta Soc + \sum_{t=0}^{N-1} D(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e, \text{ et dans ce cas, } C'_{th}(t) = C'_{th_min}(k(t)) \quad \forall t \in [0..N-1].$$

La figure 42 représente les points de fonctionnement pour les deux moteurs dans le plan (régime, couple) ainsi que les courbes d'iso-consommation (de carburant ou de puissance électrique).

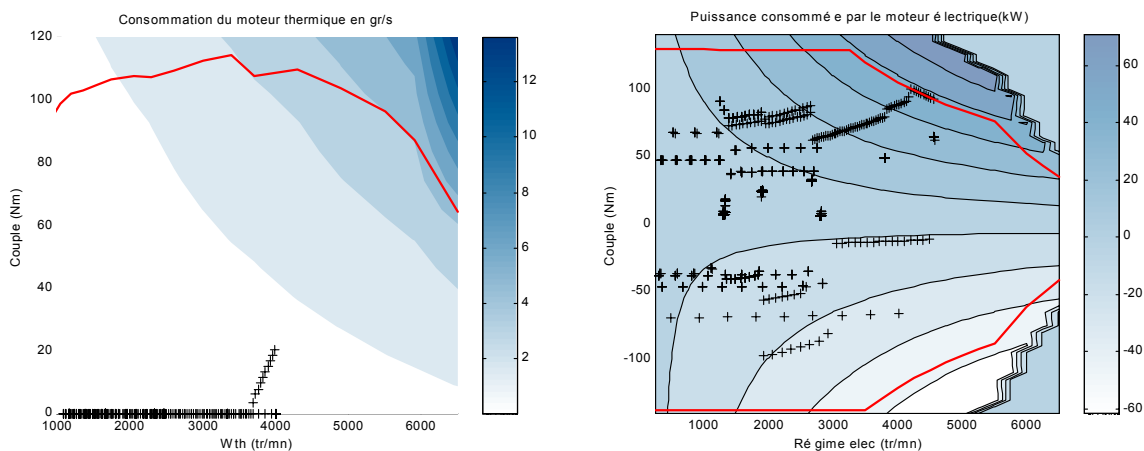


Figure 42 : Points de fonctionnement pour $\lambda(0) = 0$.

Ce cas conduit à un minimum de consommation possible de $2 l/100km$, mais bien entendu, aussi à une décharge maximale de la batterie. La variation d'état de charge minimale obtenue est alors : -29% .

- Cas « fortement » négatif : $\lambda(0) \ll 0$

Lorsque $\lambda(0) \ll 0$, par exemple $\lambda(0) = -1000$, le terme $-\lambda(0) \cdot P(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e$ est prépondérant dans le critère et donc la consommation de carburant ne sera que très peu prise

en compte. L'algorithme d'optimisation globale minimise alors la puissance électrique consommée. Les points de fonctionnement du moteur électrique sont choisis de manière à recharger la batterie, cela correspond à des puissances consommées négatives. Sur la figure 43, les points de fonctionnement du moteur thermique sont saturés : $C'_{th}(t) = C'_{th_max}(k(t)) \forall t \in [0..N-1]$. Les points de fonctionnement du moteur électrique sont positionnés sur les courbes de couple minimum *admissibles* : Le moteur électrique pourrait délivrer moins de couple, mais alors la contrainte (1.7) sur le couple du moteur thermique ne serait plus respectée. La consommation est alors très importante, $24l/100km$, mais la batterie a été rechargée au maximum : la variation d'état de charge est de $+19,7\%$.

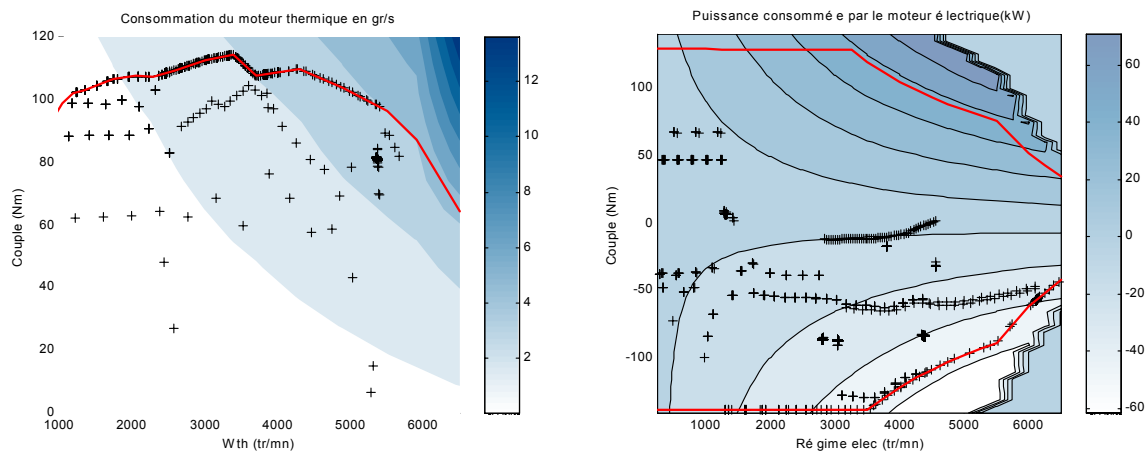


Figure 43 : Choix des points de fonctionnement pour $\lambda(0) = -1000$

- Cas « fortement » positif : $\lambda(0) \gg 0$

Lorsque $\lambda(0) \gg 0$, par exemple $\lambda(0) = 1000$, le terme prépondérant dans le critère est à nouveau $-\lambda(0) \cdot P(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e$. L'algorithme maximise la consommation d'énergie électrique, le couple du moteur électrique est maximal, celui du moteur thermique minimal figure 44.

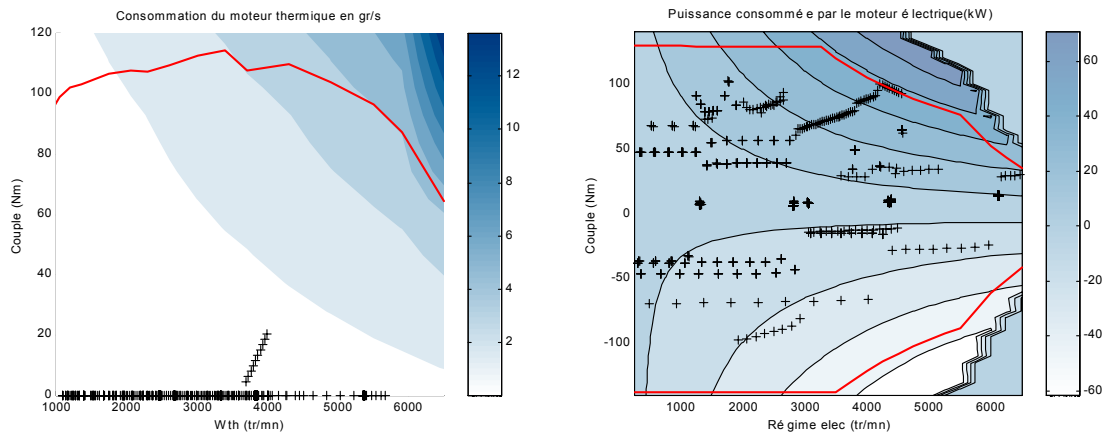


Figure 44 : Points de fonctionnement choisis pour chacun des moteurs pour $\lambda(0) = 1000$

On peut constater que les résultats obtenus avec $\lambda(0) = 1000$ sont les mêmes que pour le cas $\lambda(0) = 0$. En effet, quelque soit le régime, la consommation de carburant est minimale pour le couple minimal, et par conséquent, le couple du moteur thermique est saturé à sa plus faible valeur dès que $\lambda(0) = 0$.

Cette remarque est confirmée par la figure 45 qui représente la variation globale d'état de charge, i.e. $x(N) - x(0)$, pour différentes valeurs de $\lambda(0)$ sur le Cycle Européen Normalisé. La variation globale d'état de charge est minimale dès $\lambda(0) = -3 \cdot 10^{-5}$.

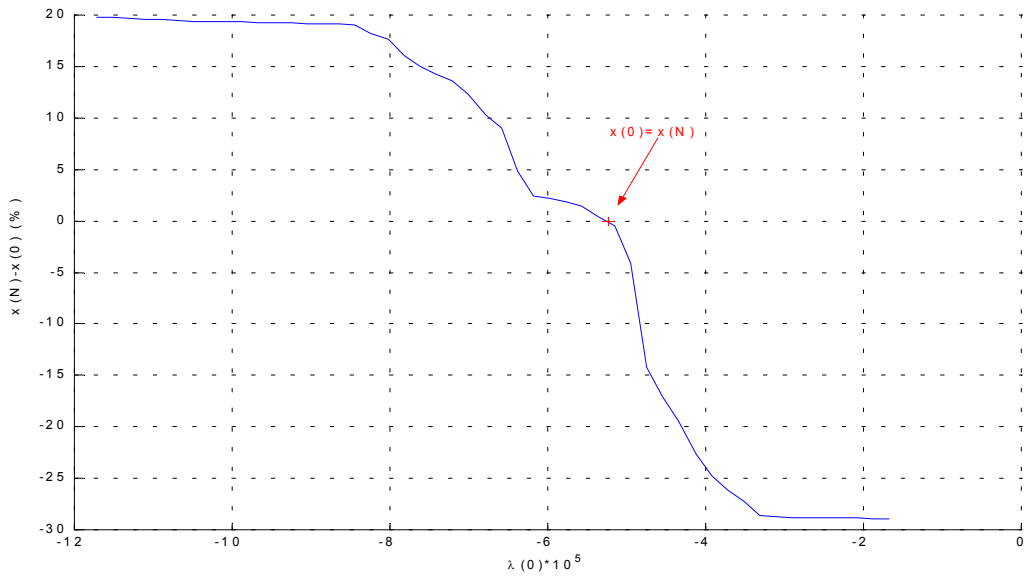


Figure 45 : Variation de $x(N) - x(0)$ en fonction de $\lambda(0)$ pour le Cycle Européen Normalisé

La valeur qui assure $|x(N) - x(0) - \Delta Soc| < \xi$ est trouvée par dichotomie, généralement entre 5 et 10 itérations sont nécessaires.

L'algorithme d'optimisation globale est donc le suivant :

Choisir une valeur initiale $\lambda(0)$

REPETER

Pour chaque $t \in \{0, \dots, N-1\}$,

Calculer l'ensemble $\Omega(t)$ des valeurs qui respectent les contraintes (3.23) et (3.24)

La valeur de $(C_{th}(t), k(t))$ qui minimise

$D(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e - \lambda(0) \cdot P(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e$ est choisie dans :

$$\Omega_{tot}(t) = \Omega(t) \cup \left\{ (C'_{th_min}(k(t)), k(t)), (C'_{th_max}(k(t)), k(t)) \right\}$$

Fin du Pour.

Calculer la valeur finale de l'état de charge : $x(N) = x(0) + \sum_{t=0}^{N-1} P(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e$

Ajuster la valeur de $\lambda(0)$ en fonction de $x(N) - x(0) - \Delta Soc$.

JUSQU'A $|x(N) - x(0) - \Delta Soc| < \varepsilon$

3.5.1.4. Limitations de l'algorithme

Plusieurs remarques peuvent être faites. Une commande n'est optimale qu'en fonction des hypothèses qui sont faites, i.e., le modèle choisi, le critère à minimiser, les contraintes etc. Elle n'est plus optimale dès lors qu'une des hypothèses n'est plus respectée.

Dans notre cas, la première restriction à faire sur l'optimalité de la solution obtenue concerne le choix du rapport de boîte. Effectivement, à chaque instant t , la commande $(C_{th}^*(t), k^*(t))$ est choisie dans un ensemble pouvant contenir plusieurs valeurs :

$$\Omega(t) \cup \left\{ (C'_{th_min}(k(t)), k(t)), (C'_{th_max}(k(t)), k(t)) \right\}.$$

On choisit celle qui minimise la quantité $D(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e - \lambda(0) \cdot P(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e$.

Pour obtenir la solution optimale, il faudrait pouvoir tester toutes les combinaisons possibles de $\Omega(t) \cup \{(C'_{th_min}(k(t)), k(t)), (C'_{th_max}(k(t)), k(t))\} \quad \forall t \in [1..N], \forall k(t) \in K(t)$ et choisir celle qui minimise le critère global $\sum_{t=0}^{N-1} \{D(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e - \lambda(0) \cdot P(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e\}$.

Cependant, choisir la commande $(C_{th}^*(t), k^*(t))$ telle que nous l'avons proposée, i.e., qui minimise seulement un critère instantané, permet d'intégrer facilement la gestion des numéros de rapports de boîte $k(t)$ et de réduire de manière considérable les temps de calculs.

De plus, la plupart du temps $\Omega(t)$ ne contenant généralement qu'une seule valeur indique que l'hypothèse faite n'est pas trop restrictive.

La deuxième restriction concerne, évidemment le contexte des simulations, dans le sens où ce sont des modèles plus complets du véhicule, des batteries, etc. qui seront pris en compte.

3.5.1.5. Résultats

Le modèle utilisé pour le calcul de la commande précédente est un modèle relativement simplifié du véhicule hybride. Certaines dynamiques ont été négligées en particulier celle du moteur thermique. Pour les simulations, les commandes calculées par l'algorithme d'optimisation globale peuvent être appliquées soit, au modèle simplifié soit, à un modèle plus complet et plus précis. Les résultats sont donnés pour une valeur de $\Delta Soc = 0$, ce qui permet de comparer les consommations de carburant avec celles du véhicule conventionnel.

3.5.1.5.1. Modèle simplifié

Sur le Cycle Européen Normalisé, une variation globale d'état de charge quasi nulle $x(N) - x(0) \approx 4,2 \cdot 10^{-2}\%$ est obtenue pour $\lambda(0) = -5,26 \cdot 10^{-5}$. La consommation de carburant est alors de $6,19 \text{ l}/100\text{km}$. La figure 46 montre le couple du moteur thermique et le numéro de rapport de boîte de vitesses sélectionné tout au long du cycle CEN.

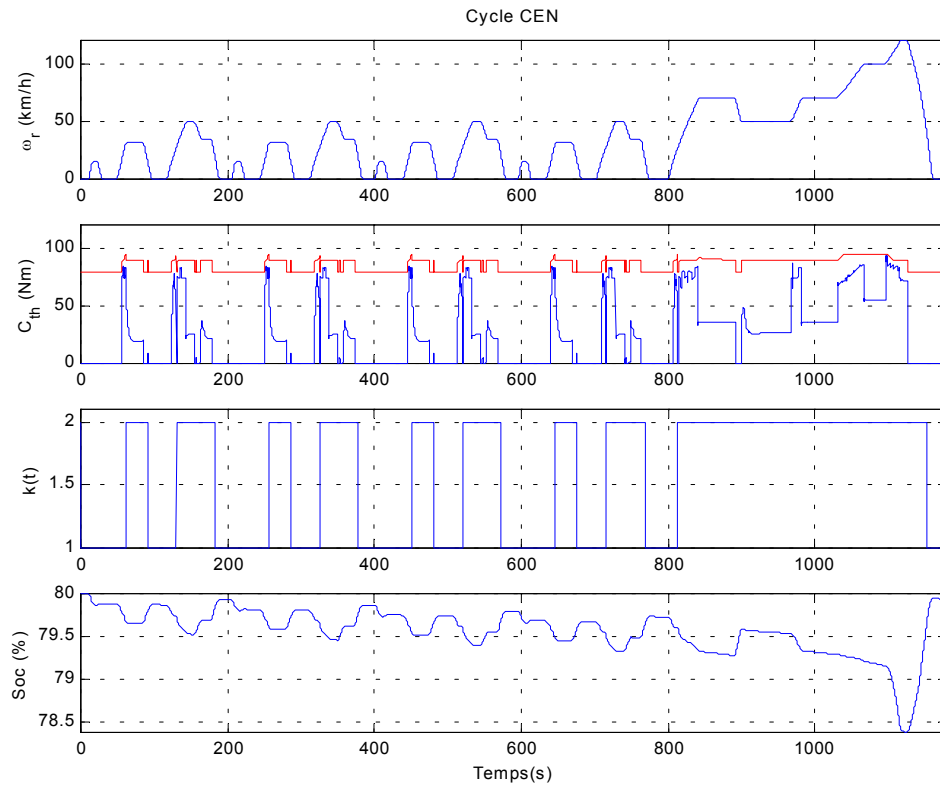


Figure 46 : Commande optimale appliquée au modèle simplifié sur le CEN

Dans le cas du modèle simplifié, certaines dynamiques ont été négligées en particulier celle du moteur thermique. Le couple aux roues effectivement réalisé est différent de la consigne demandée. Le régime du véhicule ne suit donc pas parfaitement le cycle de vitesse, figure 47.

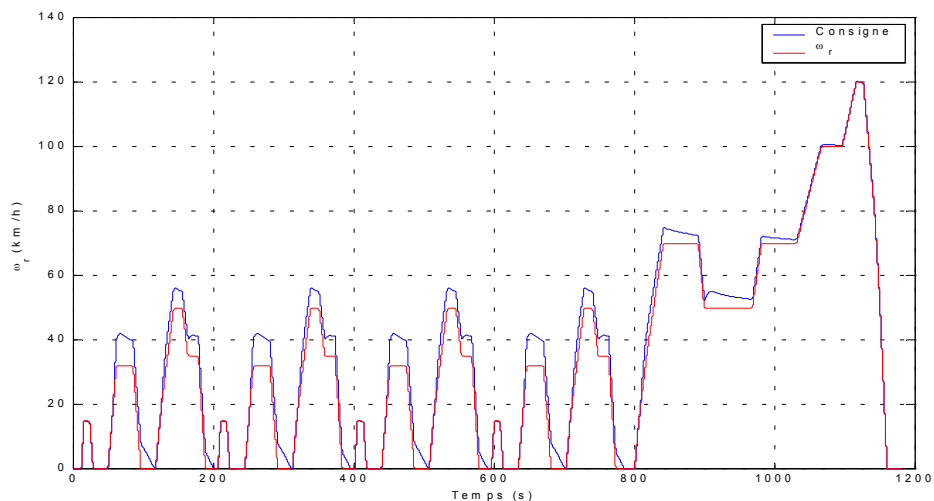


Figure 47 : Erreur de suivi de vitesse due au calcul de C_r a priori

Afin de remédier à ce problème l'algorithme d'optimisation doit être intégré dans un modèle de véhicule plus précis.

3.5.1.5.2. Modèle complet

Un modèle de véhicule a été réalisé sous Matlab/Simulink /Paganelli 1999/, figure 48, dans lequel le couple aux roues est calculé à chaque instant t par un régulateur de vitesse du véhicule qui assure, dans ce cas, le suivi du cycle de vitesse. Ce bloc peut être assimilé au conducteur du véhicule.

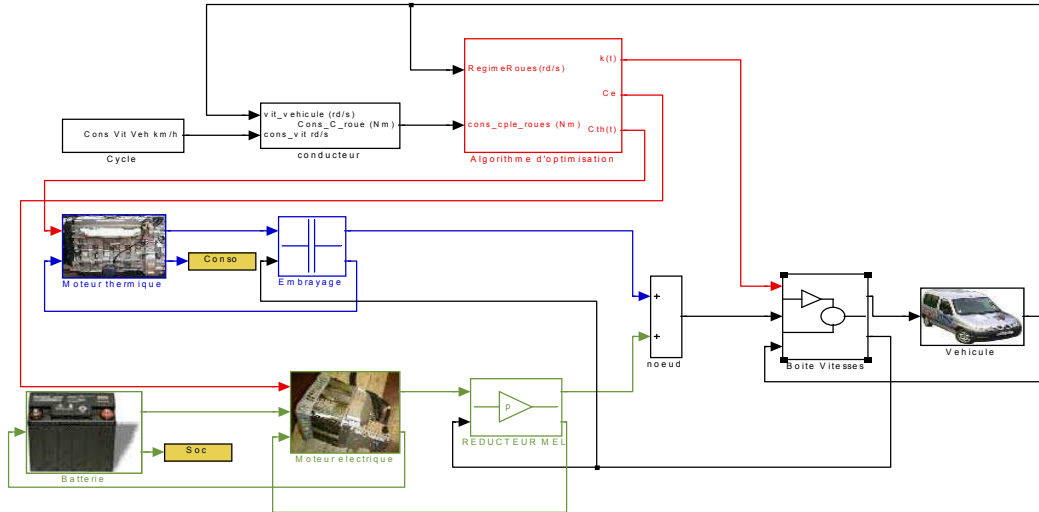


Figure 48 : Le modèle complet sous Matlab/Simulink

Sur le Cycle Européen Normalisé, une variation globale d'état de charge quasi nulle $x(N) - x(0) \approx 5,5 \cdot 10^{-2} \%$ est obtenue pour $\lambda(0) = -5,18 \cdot 10^{-5}$. La consommation de carburant est alors de $6,25 \text{ l/km}$. La figure 49 montre le couple du moteur thermique et le numéro de rapport de boîte de vitesses sélectionné tout au long du CEN.

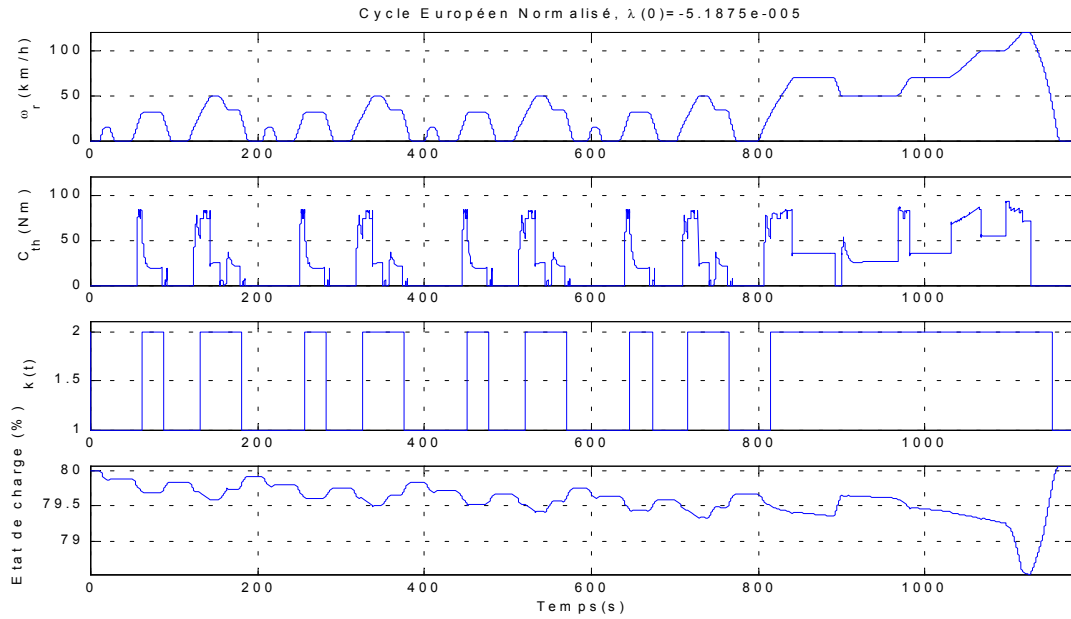


Figure 49 : Résultats de l'optimisation globale sur le CEN avec le modèle complet

L'allure des résultats est similaire à celle du modèle simplifié, cependant le suivi de vitesse est nettement amélioré, figure 50.

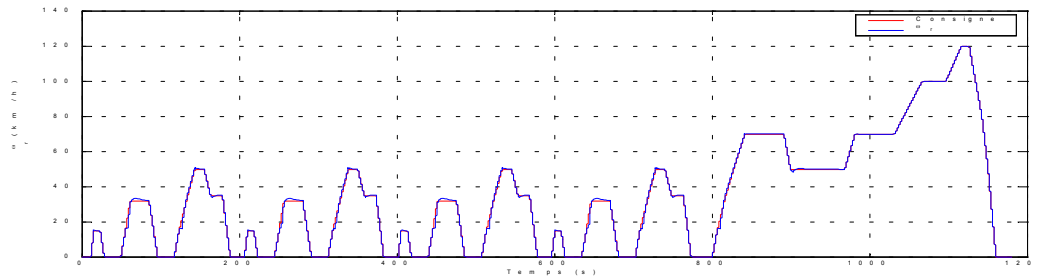


Figure 50 : Suivi de vitesse avec le modèle complet pour le CEN

Une façon d'améliorer les résultats obtenus, en termes de commande, est de considérer des modèles plus précis directement dans le problème d'optimisation. Des essais dans ce sens ont été réalisés, certains sont présentés ci-après. Il s'agit de trouver le bon compromis entre complexité accrue et amélioration de la qualité des solutions obtenues.

3.5.2. Améliorations de l'algorithme de base

3.5.2.1. Intégration du rendement de la batterie dans le problème d'optimisation /Delprat & al. 2001/

Le modèle de batterie utilisé dans l'algorithme d'optimisation globale précédent était basé sur une cartographie : $P_e(C_e(t), \omega_e(t))$. La construction de cette cartographie nécessite la prise

en compte des rendements du moteur électrique et de la batterie. Celui de la batterie étant fonction de l'état de charge, la cartographie ne peut être construite que pour un état de charge moyen, en l'occurrence 80%. Cette valeur correspond à l'état de charge initial utilisé dans toutes les simulations, et également à un état de charge réaliste pour les stratégies de commande temps réel.

Afin d'améliorer les performances de l'algorithme, un modèle plus précis du rendement des batteries peut être pris en compte dans l'algorithme d'optimisation globale. Le modèle de batterie utilisé est celui proposé par /Magyar & al. 1990/ :

$$x(t+1) = x(t) + P'_e(C_e(t), \omega_e(t)) \cdot A_{cc}(x(t), C_e(t)) \cdot T_e \quad (3.45)$$

$$\text{avec } A_{cc}(x(t), C_e(t)) = \begin{cases} 1 - e^{-k_{acc} \left(1 - \frac{x(t)}{Q_{nom} \cdot 3600 \cdot U_{batt}}\right)} & \text{si } C_e(t) < 0 \\ 1 & \text{si } C_e(t) \geq 0 \end{cases} \quad (3.46)$$

$P'_e(C_e(t), \omega_e(t))$ est la puissance (en W) consommée par le moteur électrique pour produire le couple $C_e(t)$ au régime $\omega_e(t)$ à l'instant d'échantillonnage t et $A_{cc}(x(t), C_e(t))$ est l'acceptance de charge définie dans /Magyar 1990/ avec Q_{nom} et U_{batt} , respectivement la capacité et la tension nominale de la batterie. On notera que la cartographie utilisée dans les algorithmes précédents correspond à :

$$P_e(C_e(t), \omega_e(t)) = P'_e(C_e(t), \omega_e(t)) \cdot A_{cc}(80\%, C_e(t))$$

3.5.2.1.1. Formulation du problème

Le nouveau problème d'optimisation globale, où n'apparaissent que les variables de décision, s'écrit maintenant :

- Système : $x(t+1) = x(t) + P'(C_{th}(t), k(t)) \cdot A'_{cc}(x(t), C_{th}(t)) \cdot T_e \quad (3.47)$

$$\text{avec } A'_{cc}(x(t), C_{th}(t)) = \begin{cases} \left(1 - e^{-k_{acc} \left(1 - \frac{x(t)}{Q_{nom} \cdot 3600 \cdot U_{batt}}\right)}\right) & \text{si } C_{th}(t) > C_{e_nul}(k(t)) \\ 1 & \text{si } C_{th}(t) \leq C_{e_nul}(k(t)) \end{cases}$$

$$\text{avec } C_{e_nul}(k(t)) = \frac{C_r(t)}{\eta_{bv} \cdot R(k(t))}$$

$$\text{Critère :} \quad \bar{J} = \sum_{t=0}^{N-1} D(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e \quad (3.48)$$

$$\text{Contraintes mécaniques :} \quad k(t) \in \mathbf{K}(t) \quad (3.49)$$

$$C'_{th_min}(k(t)) \leq C_{th}(t) \leq C'_{th_max}(k(t)) \quad (3.50)$$

$$\text{Contrainte sur l'état de charge :} \quad \sum_{t=0}^{N-1} P'(C_{th}(t), k(t)) \cdot A'_{cc}(x(t), C_{th}(t)) \cdot T_e = \Delta Soc \quad (3.51)$$

Comme précédemment, la contrainte mécanique (3.50) et le modèle du système (3.47) sont introduits dans le critère (3.48) en utilisant deux paramètres de Lagrange $\lambda(t)$ et $\gamma(t)$ $\forall t \in [0..N-1]$. Le problème d'optimisation s'écrit donc :

$$\begin{aligned} \min_{\substack{C_{th}(t), \\ k(t) \in \mathbf{K}(t), \\ \Gamma(t), \lambda(t), \gamma(t)}}} \bar{J}' = \sum_{t=0}^{N-1} \{ & D'(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e \\ & + \lambda(t) \cdot (x(t+1) - x(t) - P'(C_{th}(t), k(t)) \cdot A'_{cc}(x(t), C_{th}(t)) \cdot T_e) \\ & + \gamma(t) \cdot (C_{th}(t)^2 + C_{th}(t) \cdot A(k(t)) + B(k(t)) + \Gamma(t)^2) \} \end{aligned} \quad (3.52)$$

$$\text{Sous la contrainte :} \quad x(N) = x(0) + \Delta Soc$$

Les conditions au premier ordre sont données par les dérivées partielles :

$$\frac{\partial \bar{J}'}{\partial \lambda(t)} = 0 \Leftrightarrow x(t+1) - x(t) - P'(C_{th}(t), k(t)) \cdot A'_{cc}(x(t), C_{th}(t)) \cdot T_e = 0 \quad (3.53)$$

$$\frac{\partial \bar{J}'}{\partial \gamma(t)} = 0 \Leftrightarrow C_{th}(t)^2 + C_{th}(t) \cdot A(k(t)) + B(k(t)) + \Gamma(t)^2 = 0 \quad (3.54)$$

$$\frac{\partial \bar{J}'}{\partial \Gamma(t)} = 0 \Leftrightarrow \Gamma(t) \cdot \gamma(t) = 0 \quad (3.55)$$

Dans la suite, deux cas seront considérés à plusieurs reprises, le premier correspond à un couple électrique négatif, soit $C_{th}(t) \leq C_{e_nul}(k(t))$, il sera désigné par *cas 1*, le second correspond à un couple électrique positif, soit $C_{th}(t) > C_{e_nul}(k(t))$, il sera désigné par *cas 2*,

- *cas 1* : $A'_{cc}(x(t), C_{th}(t)) = 1$

$$\frac{\partial \bar{J}'}{\partial C_{th}(t)} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial D'(C_{th}(t), k(t))}{\partial C_{th}(t)} - \lambda(t) \cdot \frac{\partial P'(C_{th}(t), k(t))}{\partial C_{th}(t)} + \gamma(t) \cdot (2 \cdot C_{th}(t) + A(k(t))) = 0 \quad (3.56)$$

$$\frac{\partial \bar{J}'}{\partial x(t)} = 0 \Leftrightarrow \lambda(t) = \lambda(t-1) \quad (3.57)$$

- cas 2 : $A'_{cc}(x(t), C_{th}(t)) = 1 - e^{-k_{acc} \cdot \left(1 - \frac{x(t)}{Q_{nom} \cdot 3600 \cdot U_{batt}}\right)}$.

$$\frac{\partial \bar{J}'}{\partial x(t)} = 0 \Leftrightarrow \lambda(t-1) - \lambda(t) \cdot \left(1 + \frac{k_{acc} \cdot T_e \cdot P'(C_{th}(t), k(t)) \cdot (A'_{cc}(x(t), C_{th}(t)) - 1)}{Q_{nom} \cdot 3600 \cdot U_{batt}}\right) = 0 \quad (3.58)$$

$$\frac{\partial \bar{J}'}{\partial C_{th}(t)} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial D(C_{th}(t), k(t))}{\partial C_{th}(t)} - \lambda(t) \cdot \frac{\partial P'(C_{th}(t), k(t))}{\partial C_{th}(t)} \cdot A'_{cc}(x(t), C_{th}(t)) + \gamma(t) \cdot (2 \cdot C_{th}(t) + A(k(t))) = 0 \quad (3.59)$$

3.5.2.1.2. Résolution du problème d'optimisation globale

- Calcul de $\lambda(t)$:

$$\text{cas 1 : } \lambda(t) = \lambda(t-1) \text{ si } C_{th}(t) \leq C_{e_mul}(k(t))$$

$$\text{cas 2 : } \lambda(t) = \lambda(t-1)/(1+f) \text{ si } C_{th}(t) > C_{e_mul}(k(t))$$

$$\text{avec } f \triangleq \frac{k_{acc} \cdot T_e \cdot P'(C_{th}(t), k(t)) \cdot (A'_{cc}(x(t), C_{th}(t)) - 1)}{Q_{nom} \cdot 3600 \cdot U_{batt}}$$

En considérant que la dynamique de l'état de charge $x(t)$ est relativement faible par rapport à la période d'échantillonnage, l'approximation suivante $A'_{cc}(x(t), C_{th}(t)) \approx A'_{cc}(x(t-1), C_{th}(t))$ permet de calculer la valeur de $\lambda(t)$ si $C_{th}(t) > C_{e_mul}(k(t))$:

$$\lambda(t) = \lambda(t-1)/(1+f) \quad (3.60)$$

$$\text{Avec } f' \triangleq \frac{k_{acc} \cdot T_e \cdot P'(C_{th}(t), k(t)) \cdot (A'_{cc}(x(t-1), C_{th}(t-1)) - 1)}{Q_{nom} \cdot 3600 \cdot U_{batt}}$$

Si $\lambda(t-1)$ est connu, il est donc possible de calculer $\lambda(t) \quad \forall t \in [1..N-1]$.

- Calcul de $C_{th}(t)$:

L'équation (3.55) peut s'écrire :

$$\Gamma(t) = 0 \quad (3.61)$$

$$\text{ou } \gamma(t) = 0 \quad (3.62)$$

Si l'équation (3.61) est vérifiée alors $C_{th}(t) \in \Omega_{bornes}(k(t)) \quad \forall k \in K(t)$. Avec

$$\Omega_{bornes}(k(t)) = \{C'_{th_min}(k(t)), C'_{th_max}(k(t))\} \quad \forall k(t) \in K(t).$$

Si (3.62) est vérifiée, (3.56) et (3.59) sont simplifiées :

$$\text{cas 1 : } C_{th}(t) \leq C_{e_mul}(k(t))$$

$$\frac{\partial \bar{J}'}{\partial C_{th}(t)} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial D'(C_{th}(t), k(t))}{\partial C_{th}(t)} - \lambda(t) \cdot \frac{\partial P'(C_{th}(t), k(t))}{\partial C_{th}(t)} = 0 \quad (3.63)$$

$$\text{cas 2 : } C_{th}(t) > C_{e_mul}(k(t))$$

$$\frac{\partial \bar{J}'}{\partial C_{th}(t)} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial D(C_{th}(t), k(t))}{\partial C_{th}(t)} - \lambda(t) \cdot \frac{\partial P'(C_{th}(t), k(t))}{\partial C_{th}(t)} \cdot A'_{cc}(x(t), C_{th}(t)) = 0 \quad (3.64)$$

Afin de pouvoir résoudre (3.63) et (3.64), les expressions analytiques de la consommation de carburant $D(C_{th}(t), k(t))$ et de $P'(C_{th}(t), k(t))$ sont nécessaires. Pour $D(C_{th}(t), k(t))$, est approchée en utilisant l'approximation par morceaux de paraboles (3.25) :

$$D(C_{th}(t), k(t)) \approx \frac{a_{th}^i(k(t))}{2} \cdot C_{th}(t)^2 + b_{th}^i(k(t)) \cdot C_{th}(t) + c_{th}^i(k(t))$$

Avec n le nombre de paraboles, chacune étant définie sur un segment $[C_{th_min}^i, C_{th_max}^i]$

$i \in \{0, \dots, n\}$, avec bien sûr, $C_{th_min}^0 = C'_{th_min}(k(t))$ et $C_{th_max}^n = C'_{th_max}(k(t))$.

De manière similaire, on obtient pour $P'(C_{th}(t), k(t))$:

$$P'(C_{th}(t), k(t)) = \frac{a_e^i(k(t))}{2} \cdot C_{th}(t)^2 + b_e^i(k(t)) \cdot C_{th}(t) + c_e^i(k(t)) \quad (3.65)$$

Calcul de $C_{th}(t)$:

- cas 1 : $C_{th}(t) \leq C_{e_mul}(k(t))$

Si $\lambda(0)$ est connu, les expressions (3.25) et (3.65) permettent de résoudre (3.63). Soit

$\Omega_{pos}(t)$ l'ensemble des valeurs telles que $C_{th}^i(t) \in [C_{th_min}^i, C_{th_max}^i]$.

- cas 2 : $C_{th}(t) > C_{e_mul}(k(t))$

(3.64) \Leftrightarrow

$$\frac{a_{th}^i(k(t)) \cdot C_{th}(t) + b_{th}^i(k(t)) - \lambda(t-1) \cdot (a_e^i(k(t)) \cdot C_{th}(t) + b_e^i(k(t))) \cdot A'_{cc}(x(t-1), C_{th}(t))}{1 + \frac{k_{acc} \cdot T_e \cdot (0.5 \cdot a_e^i(k(t)) \cdot C_{th}^2(t) + b_e^i(k(t)) \cdot C_{th}(t) + c_e^i(k(t))) \cdot (A'_{cc}(x(t-1), C_{th}(t-1)) - 1)}{Q_{nom} \cdot 3600 \cdot U_{batt}}} = 0$$

On pose :

$$a'_e = \frac{k_{acc} \cdot T_e \cdot 0.5 \cdot a_e^i(k(t)) \cdot (A'_{cc}(x(t-1), C_{th}(t)) - 1)}{Q_{nom} \cdot 3600 \cdot U_{batt}},$$

$$b'_e = \frac{k_{acc} \cdot T_e \cdot b_e^i(k(t)) \cdot (A'_{cc}(x(t-1), C_{th}(t)) - 1)}{Q_{nom} \cdot 3600 \cdot U_{batt}} \quad \text{et}$$

$$(3.64) \Leftrightarrow (a_{th}^i(k(t)) \cdot C_{th}(t) + b_{th}^i(k(t))) \cdot (a'_e(k(t)) \cdot C_{th}^2(t) + b'_e(k(t)) \cdot C_{th}(t) + c'_e(k(t))) -$$

$$\lambda(t-1) \cdot (a_e^i(k(t)) \cdot C_{th}(t) + b_e^i(k(t))) \cdot A'_{cc}(x(t-1), C_{th}(t)) = 0$$

$$\Leftrightarrow a^*(k(t)) \cdot C_{th}^3(t) + b^*(k(t)) \cdot C_{th}^2(t) + c^*(k(t)) \cdot C_{th}(t) + d^*(k(t)) = 0 \quad (3.66)$$

avec $a^*(k(t)) = a_{th}^i(k(t)) \cdot a_e'(k(t))$

$$b^*(k(t)) = a_{th}^i(k(t)) \cdot b_e'(k(t)) + b_{th}^i(k(t)) \cdot a_e'(k(t))$$

$$c^*(k(t)) = a_{th}^i(k(t)) \cdot c_e'(k(t)) + b_{th}^i(k(t)) \cdot b_e'(k(t)) - \lambda(t-1) \cdot a_e^i(k(t)) \cdot A'_{cc}(x(t-1), C_{th}(t))$$

$$d^*(k(t)) = b_{th}^i(k(t)) \cdot c_e'(k(t)) - \lambda(t-1) \cdot b_e^i(k(t)) \cdot A'_{cc}(x(t-1), C_{th}(t))$$

Soit $\Omega_{neg}(t)$ l'ensemble des solutions de (3.66) obtenues telles que $C_{th}(t) > C_{e_nul}(k(t))$, par exemple avec la méthode de Cardan.

Les commandes $(C_{th}^*(t), k^*(t))$ qui minimisent (3.52) sont choisies dans l'ensemble $\Omega_{tot}(t) = \Omega_{bornes}(t) \cup \Omega_{pos}(t) \cup \Omega_{neg}(t) \quad \forall k(t) \in K(t)$.

3.5.2.1.3. Algorithme

Il est nécessaire de pouvoir choisir à chaque instant, une solution dans $\Omega_{tot}(t)$. Il est, comme précédemment, hors de question d'explorer l'ensemble des combinaisons possibles. La solution retenue ici, qui correspond donc à une commande sous-optimale est de choisir celle qui minimise de façon instantanée :

$$D'(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e - \lambda(t) \cdot P'(C_{th}(t), k(t)) \cdot A'_{cc}(x(t), C_{th}(t)) \cdot T_e \quad (3.67)$$

Cette équation suppose en fait que l'état de charge entre deux instants d'échantillonnage successifs est sensiblement constant $x(t+1) \approx x(t)$. L'algorithme final est donc similaire à celui du problème précédent :

Choisir une valeur initiale $\lambda(0)$

REPETER

Pour chaque $t \in \{0, \dots, N-1\}$,

Calculer la valeur de $C_{e_nul}(k(t))$

Calculer l'ensemble $\Omega_{pos}(t)$ des valeurs telles que $C_{th}(t) \leq C_{e_nul}(k(t))$

Calculer l'ensemble $\Omega_{neg}(t)$ des valeurs telles que $C_{th}(t) > C_{e_nul}(k(t))$

Pour chacune des valeurs de $\Omega_{tot}(t) = \Omega_{bornes}(t) \cup \Omega_{pos}(t) \cup \Omega_{neg}(t)$ calculer la valeur

$$\text{de } \lambda(t) = \begin{cases} \lambda(t-1)/(1+f') & \text{si } C_{th}(t) > C_{e_nul}(k(t)) \\ \lambda(t-1) & C_{th}(t) \leq C_{e_nul}(k(t)) \end{cases}$$

Chercher $(C_{th}^*(t), k^*(t))$, la valeur de $\Omega_{tot}(t)$ qui minimise

$$D'(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e - \lambda(t) \cdot P'(C_{th}(t), k(t)) \cdot A'_{cc}(x(t), C_{th}(t)) \cdot T_e.$$

Fin du Pour.

Calculer la valeur finale de l'état de charge : $x(N)$

Ajuster la valeur de $\lambda(0)$ en fonction de $x(N) - x(0) - \Delta Soc$.

JUSQU'À $|x(N) - x(0) - \Delta Soc| < \varepsilon$

3.5.2.1.4. Résultats (sur le modèle complet)

Pour illustrer les résultats de l'algorithme, des essais sur le cycle CEN ont été réalisés. Ils sont confrontés avec ceux issus du premier algorithme et présentés figure 51. On rappelle que cet algorithme utilise une cartographie qui correspond à un état de charge donné de 80%. Le cycle utilisé est le CEN, et la figure 51 présente la consommation du Berlingo prototype en simulation en fonction de la variation globale d'état de charge ΔSoc . La différence entre les deux résultats n'excède pas 3%. Sur ce type de profil de vitesse, il est naturel que la différence ne soit guère importante dans la mesure où la variation globale de l'état de charge est relativement restreinte, en particulier par le fait que le cycle est court.

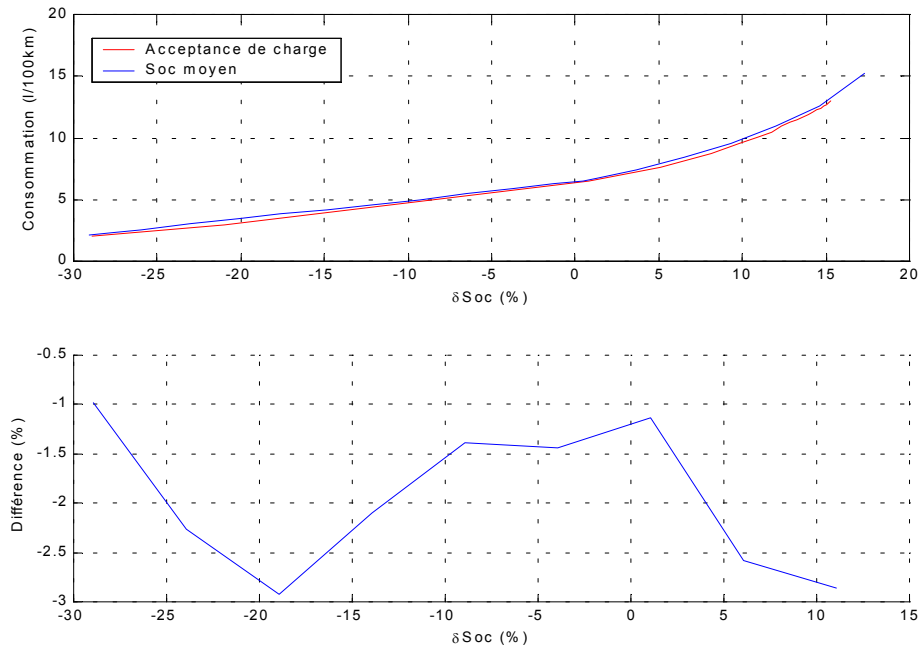


Figure 51 : Comparaison des algorithmes pour le CEN

Cependant, pour pouvoir effectivement vérifier l'apport de cette prise en compte du rendement, il faudrait confronter les deux algorithmes sur des cycles longs ou en modes « dégradés », par exemple, pour des cycles où l'état de charge s'éloigne beaucoup de l'état de charge visé ou lorsque l'état initial est très différent de l'état de charge visé.

Dans le contexte de cette étude, les essais seront principalement faits sur des cycles courts avec un $Soc_{visé}$ aux alentours de 80%. De plus, les temps de calculs étant plus importants pour l'algorithme utilisant l'acceptance de charge, l'évaluation des stratégies de commande sera faite avec le premier algorithme présenté utilisant une cartographie construite autour de l'état de charge moyen.

Les algorithmes présentés ne prennent pas en compte la gestion de l'état du moteur thermique, i.e., allumé ou éteint, dans le sens où ce dernier est fixé par des règles externes aux algorithmes, par exemple : au bout de 3s d'arrêt véhicule, le moteur thermique est éteint. Naturellement, ce choix de « stop and go » du moteur thermique est directement lié à la consommation de carburant. Il est alors nécessaire de pouvoir l'inclure dans l'algorithme d'optimisation globale.

3.5.2.2. Intégration de l'état du moteur thermique dans l'algorithme d'optimisation globale

L'algorithme d'optimisation globale est alors modifié pour optimiser également le choix de l'état du moteur thermique. Soit $\mathcal{G}(t) \in \{0,1\}$ l'état du moteur thermique. Par convention, le moteur thermique est allumé si $\mathcal{G}(t) = 1$.

Le moteur thermique ne peut être éteint que si le moteur électrique est capable de produire à lui seul l'intégralité du couple demandé aux roues. A chaque instant, l'état du moteur thermique $\mathcal{G}(t)$ appartient donc à un ensemble de valeurs admissibles

$$\phi(t) \in \{\{0\}, \{1\}, \{0,1\}\} :$$

$$\phi(t) = 1 \text{ si } \frac{C_r(t)}{R(k(t)) \cdot \eta_{bv} \cdot \rho \cdot \eta_{red}} > C_{e_max}(\omega_e(t)) \quad (3.68)$$

$$\phi(t) = \{0,1\} \text{ si } \frac{C_r(t)}{R(k(t)) \cdot \eta_{bv} \cdot \rho \cdot \eta_{red}} \leq C_{e_max}(\omega_e(t))$$

Le problème d'optimisation s'écrit alors :

$$\begin{aligned} \min_{\substack{C_{th}(t), k(t), \mathcal{G}(t), \\ \gamma(t), \lambda(t), \Gamma(t)}}} J'' = & \sum_{t=0}^{N-1} \left\{ D(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e \cdot \mathcal{G}(t) \right. \\ & + \lambda(t) \cdot (x(t+1) - x(t) - P(C_{th}(t) \cdot \mathcal{G}(t), k(t)) \cdot T_e) \\ & \left. + \gamma(t) \cdot (-C_{th}(t)^2 + C_{th}(t) \cdot B(k(t)) + A(k(t)) + \Gamma(t)^2) \right\} \end{aligned} \quad (3.69)$$

$$\text{Contraintes mécaniques : } \quad k(t) \in K(t)$$

$$\mathcal{G}(t) \in \phi(t)$$

$$\text{Contrainte sur l'état de charge : } x(N) = x(0)$$

Une solution du problème d'optimisation (3.69) est donc une matrice contenant à chaque instant le couple du moteur thermique, le numéro de rapport de boîte de vitesses et l'état du moteur thermique.

A chaque instant t , deux cas sont possibles :

- 1^{er} cas : Si $1 \in \phi(t)$ le moteur thermique peut être allumé

Si $\mathcal{G}(t) = 1$, le problème (3.69) se réduit au problème d'optimisation (3.18), et l'ensemble des solutions $(C_{th}(t), k(t), 1)$ de ce problème à l'instant t est noté $\Omega_{on}(t)$.

- 2^{ème} cas : Si $0 \in \phi(t)$, $C_{th}(t) = 0$, il ne reste plus qu'à choisir le numéro du rapport de boîte de vitesses $k(t)$ et l'ensemble des solutions $(0, k(t), 0)$ à l'instant t est noté $\Omega_{off}(t)$.

A chaque instant t , la solution $(C_{th}^*(t), k^*(t), \mathcal{G}^*(t))$ qui minimise $D(C_{th}(t), k(t)) \cdot \mathcal{G}(t) - \lambda(t) \cdot P(C_{th}(t), \mathcal{G}(t), k(t))$ est choisie dans $\Omega(t) = \Omega_{off}(t) \cup \Omega_{on}(t)$.

Les mêmes remarques que celles précédemment faites sur l'optimalité de la solution peuvent être faites.

L'algorithme d'optimisation globale intégrant la gestion de l'état du moteur thermique est alors le suivant :

Choisir une valeur initiale $\lambda(0)$

REPETER

Pour chaque $t \in \{0, \dots, N-1\}$,

Si $1 \in \phi(t)$, calculer l'ensemble

$$\Omega_{on}(t) = \Omega(t) \cup \left\{ (C'_{th_min}(k(t)), k(t), 1), (C'_{th_max}(k(t)), k(t)), 1) \right\}$$

des solutions du problème réduit (moteur thermique allumé) sinon $\Omega_{on}(t) = \emptyset$.

Si $0 \in \phi(t)$, calculer l'ensemble des solutions obtenues moteur thermique éteint :

$$\Omega_{off}(t) = \left\{ (0, k(t), 0) \right\}_{\forall k(t) \in K(t)} \text{ sinon } \Omega_{off}(t) = \emptyset.$$

Choisir la solution $(C_{th}^*(t), k^*(t), \mathcal{G}^*(t)) \in (\Omega_{off}(t) \cup \Omega_{on}(t))$ qui minimise

$$D(C_{th}(t), k(t)) \cdot \mathcal{G}(t) - \lambda(t) \cdot P(C_{th}(t), \mathcal{G}(t), k(t))$$

Fin du Pour.

Calculer la valeur finale de l'état de charge : $x(N) = x(0) + \sum_{t=0}^{N-1} P(C_{th}^*(t), k^*(t)) \cdot T_e$

Ajuster la valeur de $\lambda(0)$ en fonction de $x(N) - x(0) - \Delta Soc$.

JUSQU'À $|x(N) - x(0) - \Delta Soc| < \varepsilon$

Les résultats obtenus par l'algorithme sur le cycle CEN sont représentés sur la figure 52. La consommation de carburant est de $5,48 l/100km$ et la variation globale d'état de charge $\Delta Soc = -0,06\%$. Par rapport aux résultats obtenus auparavant, on s'aperçoit que la gestion de l'état du moteur thermique permet d'améliorer nettement la consommation.

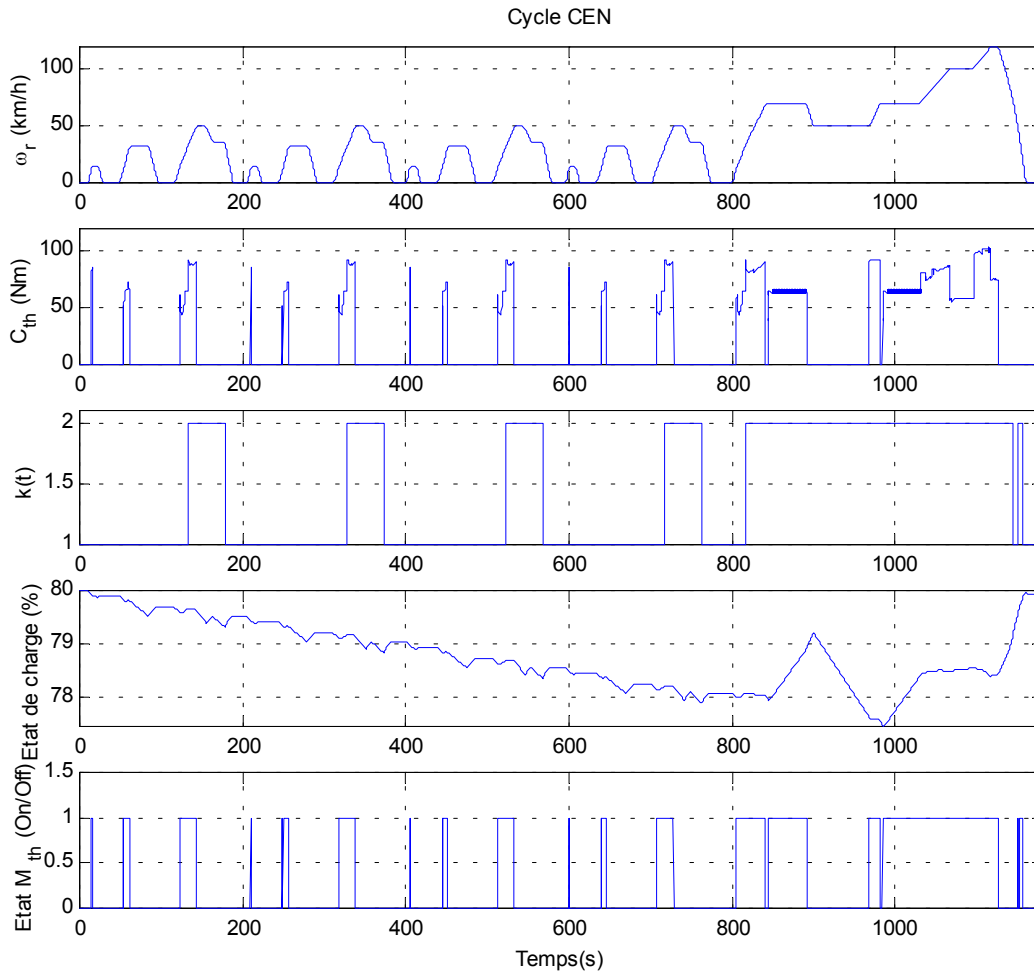


Figure 52 : Résultats obtenus sur le Cycle Européen Normalisé

Néanmoins, on remarque que l'état du moteur n'est pas réaliste, par exemple vers $t = 210s$, le moteur n'est allumé que sur $2s$. Si on utilise d'autres cycles, le moteur peut être allumé et éteint trois fois en $10s$.

Une manière de rendre plus réaliste cette gestion de l'état du moteur est d'introduire une contrainte sur la fréquence des changements de rapports.

Rappelons que l'un des objectifs est l'évaluation des stratégies de commande, et donc la recherche d'un minimum *absolu* de consommation de carburant, il ne s'agit donc pas d'être réaliste. En résumé, la solution obtenue sans contrainte supplémentaire fournit seulement une borne minimale de consommation.

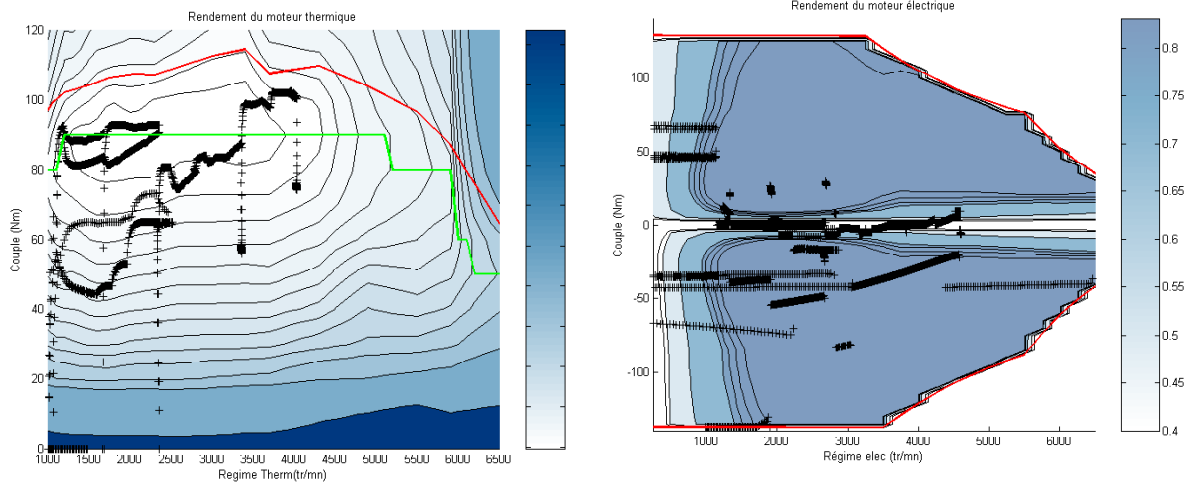


Figure 53 : Rendement du moteur thermique & électrique pour le cycle CEN

La figure 53 montre le choix des points de fonctionnement sur le Cycle Européen Normalisé dans le plan couple-régime de chacun des moteurs. Les points de fonctionnement du moteur thermique sont positionnés principalement près de son couple optimal, là où son rendement est maximal. La puissance ainsi récupérée est utilisée pour assurer la propulsion du véhicule pour des vitesses faibles.

La figure 54 représente le couple électrique en fonction de celui du moteur thermique, la partie droite pour le cycle CEN, la partie gauche pour le cycle routier n°1.

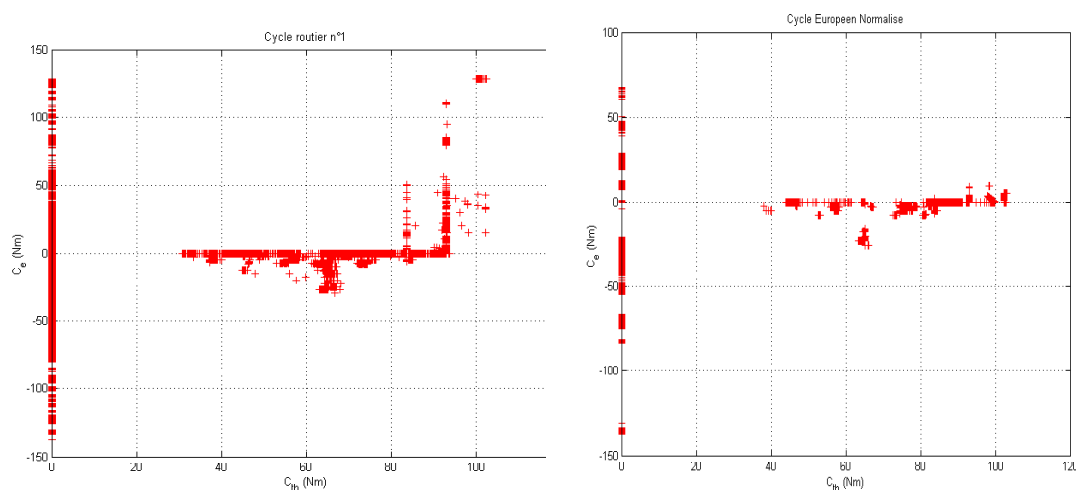


Figure 54 : Points de fonctionnement dans le plan (C_{th}, C_e) pour le CEN et le cycle Routier n°1

Le cycle CEN est trop particulier pour fournir une interprétation intéressante de ce que « réalise » la commande mise en œuvre. La figure n'est placée ici qu'à titre d'indication. Pour le cycle routier, une remarque importante que l'on peut faire, est que, de manière générale, la répartition de couple est la suivante : quand cela est possible, le couple du moteur thermique

est positionné autour de son couple optimal et le moteur électrique permet de délivrer le supplément d'énergie nécessaire pour suivre le cycle.

3.6. Conclusion

Le problème des stratégies de commande a été formulé sous la forme d'un problème d'optimisation sous contraintes. Plusieurs algorithmes d'optimisation globale ont été envisagés. Un recuit simulé ainsi qu'un algorithme basé sur le principe de la programmation dynamique peuvent être appliqués, mais les temps de calculs nécessaires sont prohibitifs et limitent donc leur utilisation à des cycles de vitesse relativement courts.

Afin de remédier à ce problème, une approche basée sur la théorie de la commande optimale a été proposée. Un premier algorithme est construit pour un modèle simplifié du véhicule. Il permet d'une part de concilier temps de calcul et qualité de la solution obtenue. Deux autres algorithmes permettant d'intégrer d'autres nouvelles variables de décision ou bien un modèle plus précis de batterie ont été proposés.

Les résultats obtenus avec ces algorithmes serviront de référence pour l'évaluation des stratégies de commande temps réel présentée dans le chapitre suivant.

Chapitre 4.

Stratégies de commande temps réel : propositions, évaluations, validations

4.1. Introduction	100
4.2. Estimation de l'état de charge	100
4.2.1. Méthodes basées sur l'intégrale du courant	101
4.2.2. Approche courant-tension	102
4.3. Propositions de stratégies de commande temps réel	106
-control	107
4.3.2. Commande par gestion du moteur thermique	108
4.3.2.1. Analyse des résultats obtenus avec l'algorithme d'optimisation globale	109
4.3.2.2. Stratégie de commande basée sur la gestion de l'état du moteur thermique	110
4.4. Evaluation des stratégies	113
4.4.1. Principe	113
4.4.2. Choix des cycles de vitesse	115
4.4.3. Evaluations des stratégies de commande	120
4.5. Évaluation de différentes architectures	122
4.5.1. Groupes motopropulseurs testés	123
4.5.2. Résultats obtenus	124
4.5.2.1. Architecture simple arbre	124
4.5.2.2. Architecture double arbre	126
4.5.3. Critère synthétique de performance	128
4.6. Conclusion	129

4.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'aller vers une implémentation temps réel d'une ou de plusieurs stratégies de commande. La première partie présente l'un des points nécessaires à la mise en œuvre des stratégies de commandes, il s'agit de l'estimation de l'état de charge.

Ensuite, deux nouvelles stratégies de commande utilisables en temps réel sont proposées. La première est issue de l'adaptation au temps réel des algorithmes du chapitre précédent. La deuxième a été synthétisée à partir de l'analyse des résultats de ces algorithmes.

On dispose alors d'un nombre important de stratégies potentiellement utilisables pour une application temps réel. Elles sont souvent de nature très différentes. Il est possible d'en rejeter certaines directement, de choisir d'en garder une, plutôt qu'une autre. Pour éviter trop de subjectivité dans la sélection d'une stratégie de commande, des critères d'évaluation sont proposés.

Enfin, les outils développés peuvent être réutilisés plus en amont de la conception, afin d'aider, d'une part, au choix de l'architecture et d'autre part au dimensionnement des différents éléments constituant le groupe motopropulseur.

4.2. Estimation de l'état de charge

L'utilisation des batteries s'étend à de nombreux domaines. Des estimateurs d'état de charge ont déjà été réalisés, par exemple pour les véhicules électriques. Dans la majorité de ces applications, il est toujours supposé qu'au cours de son utilisation la batterie peut être rechargée suivant un profil de recharge bien défini. Après une telle recharge, l'état de charge est supposé égal à 100%.

En général, cette recharge ne sera pas réalisée systématiquement pour le véhicule hybride, dans certains cas, elle sera même impossible à réaliser. De plus, l'utilisation de la batterie pour un véhicule hybride sera nettement différente de celle d'un véhicule électrique : la variation globale de l'état de charge pour un véhicule hybride sera faible. Les estimateurs d'état de charge doivent donc être modifiés.

4.2.1. Méthodes basées sur l'intégrale du courant

La plupart des estimateurs d'état de charge utilisés pour les véhicules électriques sont construits autour de l'intégrale du courant traversant les batteries. Un exemple est donné dans /Piller & al. 2001/ :

$$Soc(t) = Soc(0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t (I_{batt}(\tau) - I_{pertes}(\tau)) d\tau \quad (4.1)$$

Avec C la capacité de la batterie, I_{batt} le courant circulant dans les batteries, I_{pertes} le courant induit par les différentes pertes dans la batterie et $Soc(0)$ l'état de charge initial de la batterie. Dans le cadre de l'application au véhicule électrique, après une recharge complète de la batterie, on pose $t = 0$ et on suppose $Soc(0) = 1$.

Inévitablement, l'algorithme cumule les erreurs sur la mesure de I_{batt} et l'estimation de I_{pertes} . Effectivement, la mesure de I_{pertes} est rarement accessible, et généralement une estimation est réalisée en utilisant, par exemple /Piller & al. 2001/ :

$$I_{pertes}(t) = I_0 \cdot \exp\left(\frac{U_{batt}(t) - U_N}{K_1} - K_2 \cdot \frac{T(t) - T_N}{T(t) \cdot T_N}\right) \quad (4.2)$$

$$I_0 = K_0 \cdot \exp\left(\frac{U_N}{K_1} - \frac{K_2}{T_N}\right) \quad (4.3)$$

Avec K_0 , K_1 , K_2 des constantes, $U_{batt}(t)$ la tension mesurée aux bornes de la batterie, U_N tension nominale à vide, T_N température de référence, $T(t)$ température mesurée. Un des problèmes est alors l'estimation des différents coefficients. Des méthodes d'identification sont disponibles mais nécessitent pour la plupart d'effectuer des mesures sur un banc de test.

Lorsque le recalage est possible, réalisé généralement en rechargeant la batterie, la dérive inévitable de l'estimation reste limitée. Pour une application au véhicule électrique, ce recalage discret est suffisant, les méthodes basées sur l'intégrale du courant suffisent et ont été appliquées avec succès /Barbier & al. 1994/.

4.2.2. Approche courant-tension

Afin d'éviter l'accumulation des erreurs liées à l'utilisation d'une méthode basée sur une intégrale, une approche basée sur l'estimation de la résistance interne de la batterie peut être envisagée /Pang & al. 2001/. En effet, pour les batteries au plomb le constructeur donne, par cartographie, la résistance interne en fonction de l'état de charge. Un modèle électrique de batterie au plomb *très* grossier est donné figure 80.

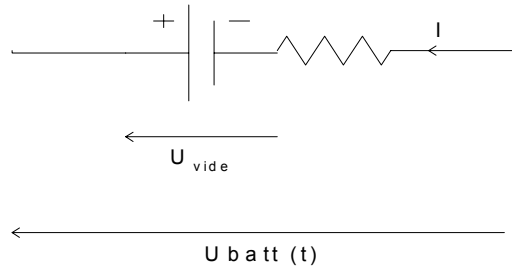


Figure 55 : Modèle électrique (très) simplifié d'une batterie au plomb

Bien entendu ce modèle, figure 55, est simpliste mais il a l'avantage d'être très facilement exploitable. Plusieurs auteurs ont travaillé sur la base de tels modèles, par exemple /Pang & al. 2001/ /Wiegman & Lorenz 1998/.

L'estimateur présenté ici, est basé sur l'estimation de la tension à vide U_{vide} . Celle-ci est réalisée à partir de mesures effectuées, en temps réel, (relevés courant tension, figure 56) en utilisant une régression linéaire sur une fenêtre temporelle glissante.

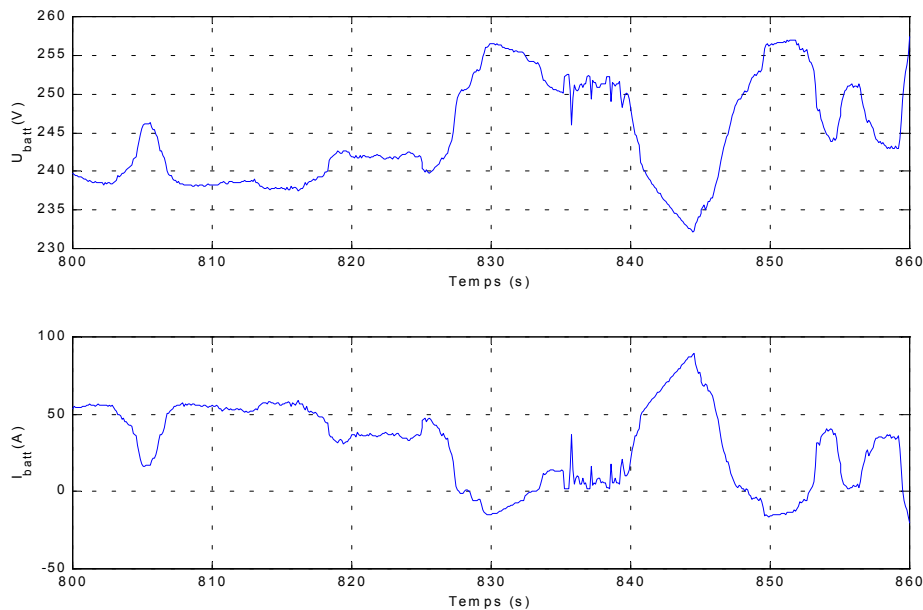


Figure 56 : Exemple de relevé courant-tension

La figure 56 représente un relevé des points courant-tension pour une expérience d'une minute. Présentés dans un plan courant tension, figure 57, l'hypothèse de linéarité est globalement respectée pour des valeurs de courant dépassant les 40A. En dessous, des phénomènes non linéaires liés à des phénomènes chimiques (non pris en compte dans cette étude) apparaissent.

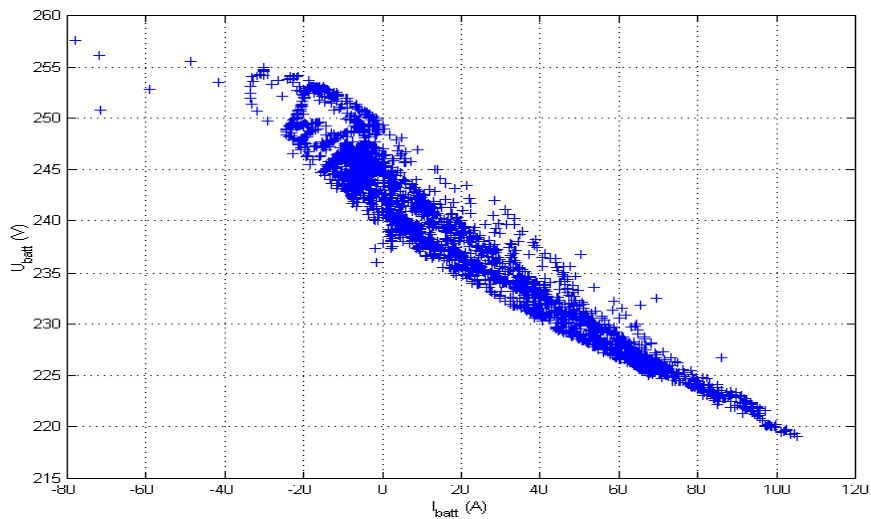


Figure 57 : Relevé Courant-Tension de la batterie au plomb

Lorsque dans une fenêtre temporelle donnée, toutes les mesures respectent l'hypothèse de linéarité et d'une condition d'excitation persistante, un algorithme de régression est utilisé pour estimer ponctuellement l'état de charge. Suivant la taille de la fenêtre et les valeurs de courant, les conditions permettant ce calcul ponctuel peuvent être difficiles à réunir. Lorsque ce n'est pas le cas, une estimation relativement simple, basée sur une intégrale du courant /Magyar & al. 1990/ est utilisée. On peut voir la méthode proposée comme une estimation continue de l'état de charge par une intégrale du courant avec un recalage ponctuel basé sur l'estimation de la tension à vide. Avec N la taille de la fenêtre $F(t_{ini}) = [t_{ini} \quad t_{ini} + N]$, l'algorithme d'estimation est :

Si $I_{batt}(t) < 40A$ pour $t \in F(t_{ini})$ Alors

$$t_{ini} = t + 1$$

$$\text{Estimer } \hat{S}o\hat{c}(t) = f(\hat{U}_{vide}) + \frac{1}{C} \int_{t_{ini}}^t (I_{batt}(\tau) - I_{pertes}(\tau)) d\tau$$

Sinon

Mettre à jour la fenêtre glissante des mesures

Si $t = t_{ini} + N$ et excitation persistance Alors

Calculer \hat{U}_{vide} , estimer $\hat{S}o\hat{c} = f(U_{vide})$ à partir des données constructeur

Sinon

$$\text{Estimer } \hat{S}o\hat{c}(t) = f(\hat{U}_{vide}) + \frac{1}{C} \int_{t_{ini}}^t (I_{batt}(\tau) - I_{pertes}(\tau)) d\tau$$

Fin si

Fin si

A titre d'illustration de l'algorithme, la figure 58 montre des résultats obtenus en temps réel sur le Berlingo prototype. Il s'agit de données mesurées sur un parcours de 1h30 effectué en mode *électrique pur*.

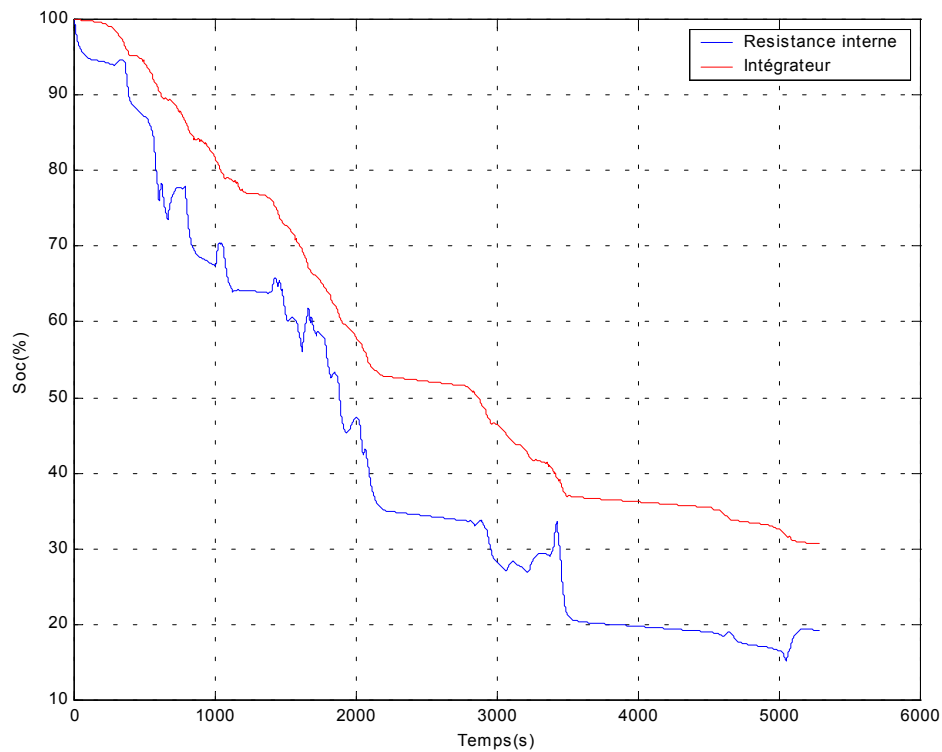


Figure 58 : Résultats obtenus avec l'estimation de la résistance à vide

Les résultats de l'intégration du courant et de l'algorithme proposés sont présentés. On peut s'apercevoir que l'écart entre ces deux méthodes est important, même si de façon globale les deux courbes évoluent dans le même sens.

Une autre expérimentation de 18 min est donnée figure 59. La batterie est initialement chargée, et le véhicule en mode *hybride*. Cette fois-ci, les courbes sont très différentes, et ceci est très certainement dû au fait que le mode *hybride* sollicite la batterie de manière très différente par rapport au mode *électrique pur*.

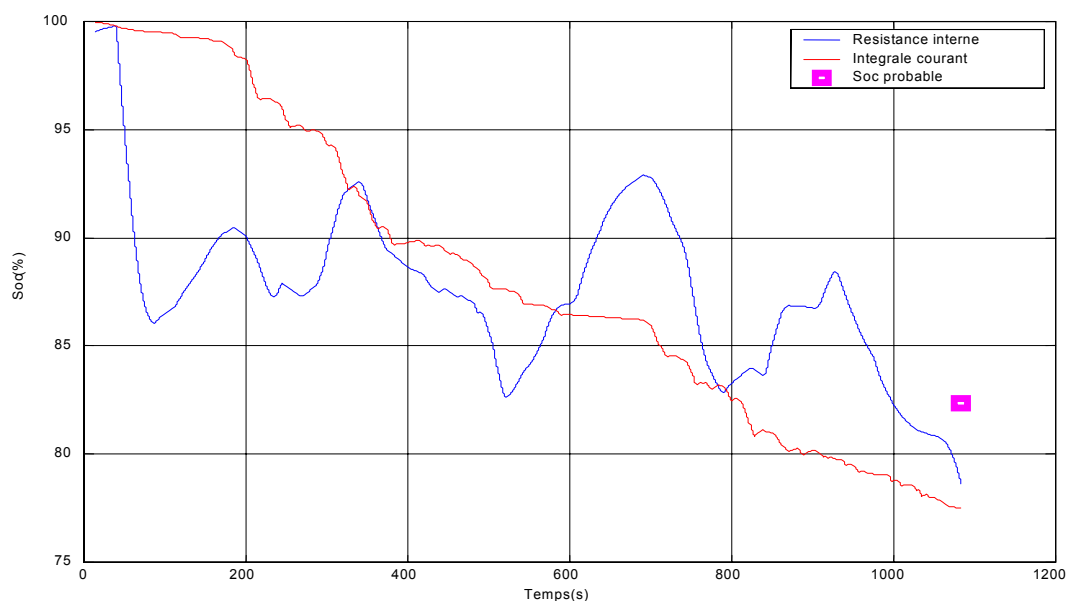


Figure 59 : Résultats de l'estimation de l'état de charge

Afin de disposer d'une estimation de l'état de charge, supposée fiable, la batterie est laissée au repos pendant 24 h après l'expérience. La tension de la batterie est ensuite mesurée et l'état charge final est estimé en utilisant les données constructeur, il est de 82%. Les deux algorithmes utilisés (estimation de la résistance interne et intégrale du courant) ont donnés à la fin de l'expérience des estimations d'état de charge inférieure à cette valeur.

Plusieurs résultats similaires ont été obtenus sur différents essais. La dérive constatée semble moins importante que celle observée avec une simple intégration de courant. Néanmoins, d'autres pistes intéressantes peuvent être explorées, notamment une approche basée sur l'utilisation de l'approximation en dimension finie du modèle diffusif /Garcia & Bernussou 1998/. Elle a déjà fait l'objet d'un développement au sein de l'équipe /Brassart 2001/.

L'estimation de l'état de charge était une des étapes nécessaires pour aller vers une mise en œuvre temps réel. Les algorithmes mis en œuvre au chapitre trois et les stratégies testées au chapitre deux nous ont permis de dégager deux nouvelles stratégies de commande.

4.3. Propositions de stratégies de commande temps réel

En premier lieu, une version temps réel inspirée des algorithmes d'optimisation globale est proposée.

4.3.1. λ -control

Pour pouvoir utiliser les algorithmes d'optimisation globale présentés précédemment pour la commande en temps réel d'un véhicule, il faut être capable de *prédire*, avant d'avoir commencé le trajet, la valeur de $\lambda(0)$ permettant d'obtenir à la fin du parcours (a priori inconnu) un état de charge égal à celui de départ ou tout au moins suffisamment proche.

Il est cependant possible de *réguler* la valeur de $\lambda(0)$ en temps réel afin que l'état de charge reste suffisamment proche d'une valeur souhaitée, figure 60 :

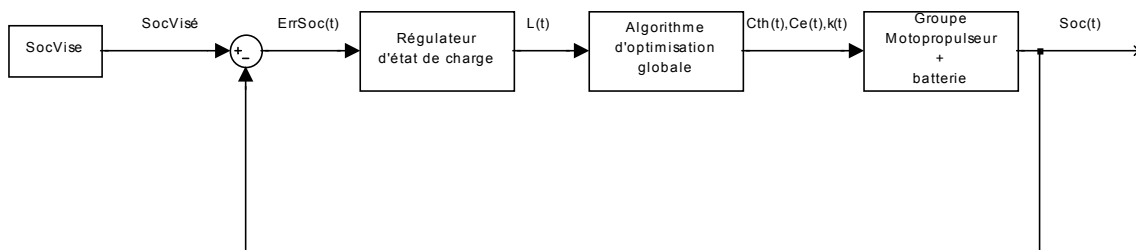


Figure 60 : Schéma fonctionnel de la stratégie de commande

A partir d'une valeur fixée $\lambda(t)$, fournie par le régulateur d'état de charge, l'algorithme d'optimisation utilisé correspond à celui décrit dans le chapitre précédent dans une version instantanée, i.e. la minimisation ne se fait plus sur l'ensemble du cycle. Il permet alors de calculer les valeurs des variables de décision $(C_{th}(t), k(t))$ (ou $(C_{th}(t), k(t), g(t))$ dans le cas où on utilise, en plus, la gestion de l'état du moteur thermique) permettant d'obtenir l'ensemble des commandes pour le groupe motopropulseur.

Au vu des dynamiques voulues en boucle fermée pour l'état de charge, il semble qu'un régulateur de type proportionnel intégral soit, en première approximation, amplement suffisant en simulation. Néanmoins, ce point doit encore être confirmé pour l'application réelle au véhicule prototype, et il est fort possible de faire appel à d'autres techniques dans le futur.

A titre d'illustration, en se remettant dans les conditions de simulation du chapitre deux, cycle Routier n°1 pour le Berlingo prototype, la consommation de carburant est de $7,9 l/100km$ et la variation globale d'état de charge est de $-1,2\%$, figure 61.

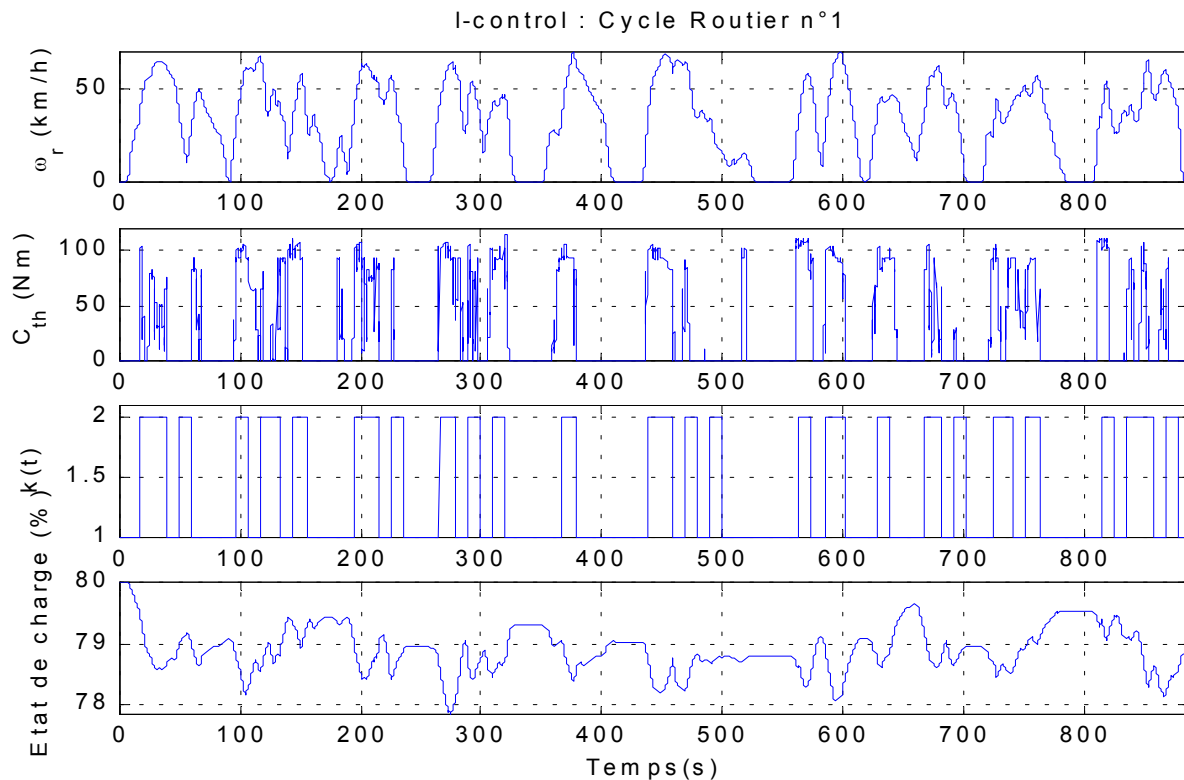


Figure 61 : Résultats obtenus avec la stratégie λ -control sur le cycle Routier n°1

Il est tout à fait possible d'envisager d'autres types de commande basés sur un principe similaire. Par exemple, la minimisation peut être effectuée sur une fenêtre temporelle glissante, ou on peut également utiliser des techniques de commande prédictive.

L'étude décrite dans le chapitre précédent nous a permis d'obtenir non seulement un outil de calcul de courbes de consommation proche d'un optimum, mais aussi de disposer d'une sorte d'« expert » algorithmique. L'analyse issue des résultats fournis par « son » expertise a permis d'aboutir à une nouvelle stratégie décrite dans le paragraphe suivant.

4.3.2. Commande par gestion du moteur thermique

Certaines des stratégies de commande étudiées choisissent, à chaque instant, le couple du moteur thermique et le numéro de rapport de boîte de vitesse minimisant un critère donné (pertes dans le groupe motopropulseur pour LMS, consommation équivalente pour ECMS). L'état de charge de la batterie est alors souvent interprété comme une contrainte, dont la conséquence directe est la modification des commandes initialement choisies, entraînant une diminution des performances (fonctions de sensibilité pour ECMS et LMS). L'état du moteur thermique est géré par des règles extérieures. Les performances de ces stratégies de

commande sont donc dégradées par le compromis qui est fait entre la consommation de carburant et la gestion de l'état de charge.

L'objectif de la nouvelle stratégie est de proposer une commande pour laquelle ce compromis n'est plus nécessaire.

4.3.2.1. Analyse des résultats obtenus avec l'algorithme d'optimisation globale

La figure 62 montre les résultats obtenus avec l'algorithme d'optimisation globale intégrant la gestion de l'état du moteur thermique pour le cycle routier n°1 pour deux valeurs différentes de variation globale d'état de charge.

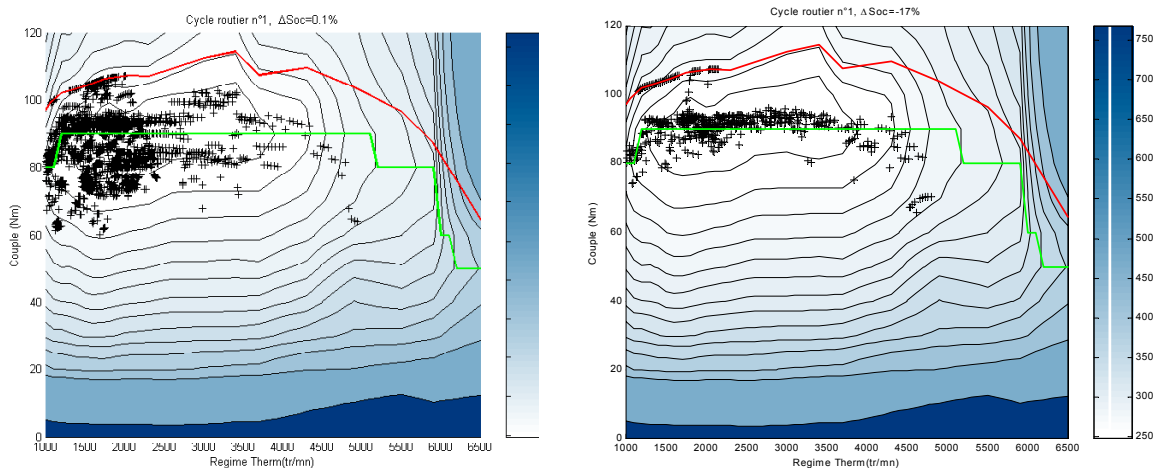


Figure 62 : Couple du moteur thermique pour deux valeurs différentes de variations globales d'état de charge

Dans les deux cas, le couple du moteur thermique est positionné près de son couple optimal et l'état de charge dépend principalement de la gestion du moteur thermique figure 63.

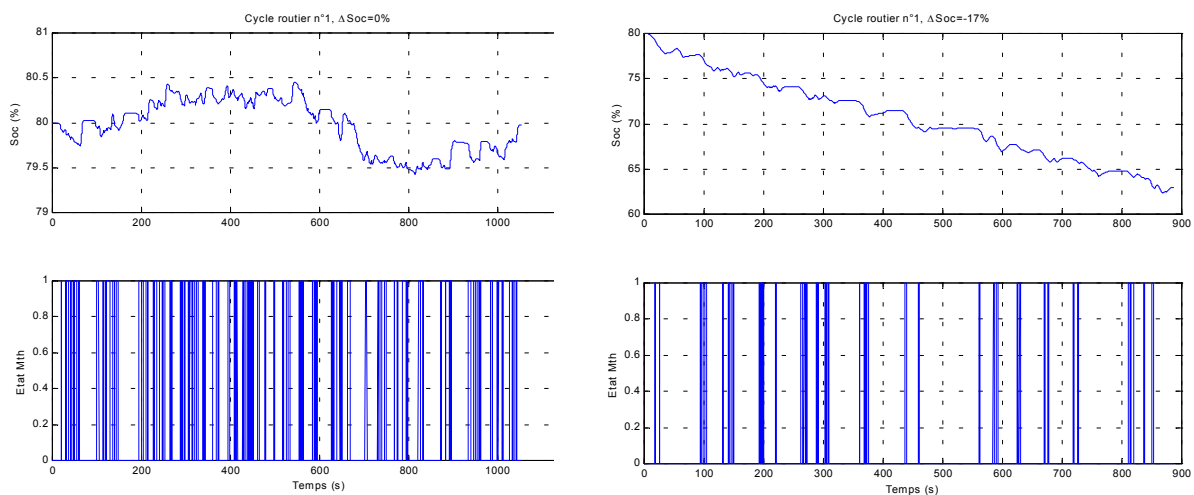


Figure 63 : Etat du moteur thermique et évolution de l'état de charge

A partir de ces deux figures, on peut formuler de la manière suivante, les résultats de l'algorithme d'optimisation globale :

- Le couple du moteur thermique est positionné sur des points de faible consommation spécifique (i.e. de meilleur rendement) afin d'assurer une consommation de carburant faible ;
- La fréquence et la durée d'arrêt du moteur thermique sont « plus ou moins » importantes en fonction de la variation globale d'état de charge recherchée.

Il y a presque découplage des commandes, couple du moteur thermique/consommation spécifique, état du moteur thermique/état de charge. Ces règles peuvent être mise à profit pour la commande en temps réel du véhicule.

4.3.2.2. Stratégie de commande basée sur la gestion de l'état du moteur thermique

Les remarques issues de l'analyse des résultats de l'algorithme d'optimisation globale peuvent être généralisées afin de proposer une stratégie de commande. Deux cas sont envisagés :

- Le premier, $\mathcal{G}(t)=1$, correspond à un mode *hybride*. En considérant les pertes dans la chaîne de traction électrique comme négligeables devant celles du moteur thermique, la commande $C_{th}(t) = C_{opti}(\omega_{th}(t))$ permet de minimiser les pertes dans le groupe motopropulseur et donc d'utiliser au mieux l'énergie consommée. Le couple optimal du moteur thermique est généralement proche du couple maximum. Par exemple, pour le moteur thermique du Berlingo Hybride, il est toujours supérieur à 80% du couple maximum. La puissance développée pour cette commande est relativement importante et donc, en moyenne, supérieure à celle nécessaire à la propulsion du véhicule. La commande $C_{th}(t) = C_{opti}(\omega_{th}(t))$ conduit donc généralement à une augmentation de l'état de charge de la batterie.
- Le second, $\mathcal{G}(t)=0$, correspond au mode *électrique pur*. Il conduit à une décharge de la batterie et le rendement de la chaîne de traction électrique est supérieur à celui de la chaîne thermique.

Dans la majorité des situations de conduite, et dans l'hypothèse où les pertes de la chaîne de traction électrique sont négligées, les commandes $(C_{th}(t) = C_{opti}(\omega_{th}(t)), \mathcal{G}(t)=1)$ pour le

mode *hybride* et ($C_{th}(t) = 0, \mathcal{G}(t) = 0$) pour le mode *électrique pur*, assurent le meilleur rendement énergétique du groupe motopropulseur.

La stratégie de commande nommée *CoupleOpti* est donc la suivante :

- Si l'état de charge $Soc(t)$ atteint la limite basse Soc_{\min} , alors le moteur thermique est allumé $\mathcal{G}(t) = 1$ et la consigne de couple est $C_{th}(t) = C_{opti}(\omega_{th}(t))$
- Si l'état de charge $Soc(t)$ atteint la limite haute Soc_{\max} alors le moteur thermique est éteint. $\mathcal{G}(t) = 0, C_{th}(t) = 0$.

Choisir $C_{th}(t) = C_{opti}(\omega_{th}(t))$ ne permet pas toujours de réaliser la consigne de couple aux roues, i.e. : $C_r(t) > R(k(t)) \cdot (C_{opti}(\omega_{th}(t)) + \rho \cdot C_{e_{\max}}(\omega_e(t)))$. Dans ce cas, le couple du moteur thermique doit être augmenté : $C_{th}(t) = \frac{C_r(t)}{R(k(t))} - \rho \cdot C_{e_{\max}}(\omega_e(t))$. Cependant, la

dégradation du rendement du moteur thermique étant faible dans la zone située entre le couple maximal et le couple optimal, cela ne pénalise pas trop la consommation de carburant.

Les résultats pour le cycle Routier n°1 sont donnés figure 64.

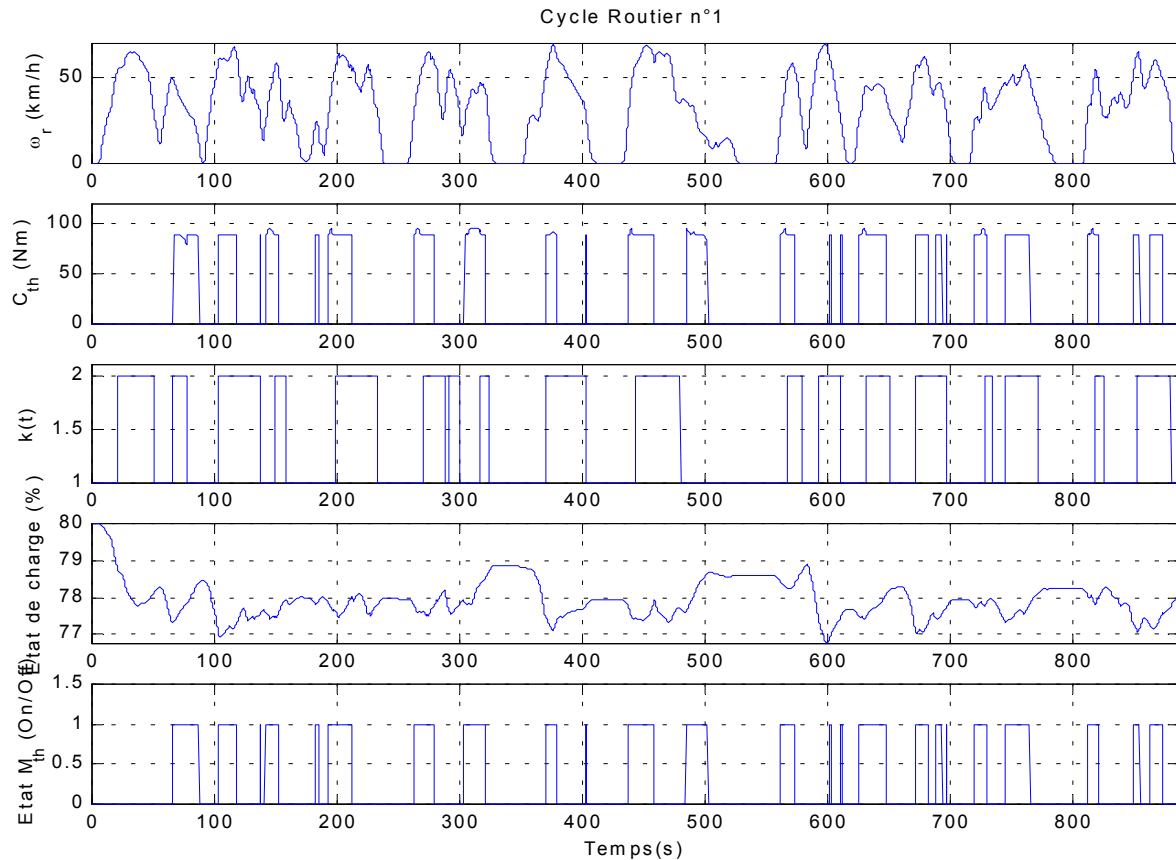


Figure 64 : Résultats obtenus sur le cycle Routier n°1 avec la stratégie CoupleOpti

La consommation sur le cycle est de $6,5 l/100km$ pour une variation globale d'état de charge de -2% .

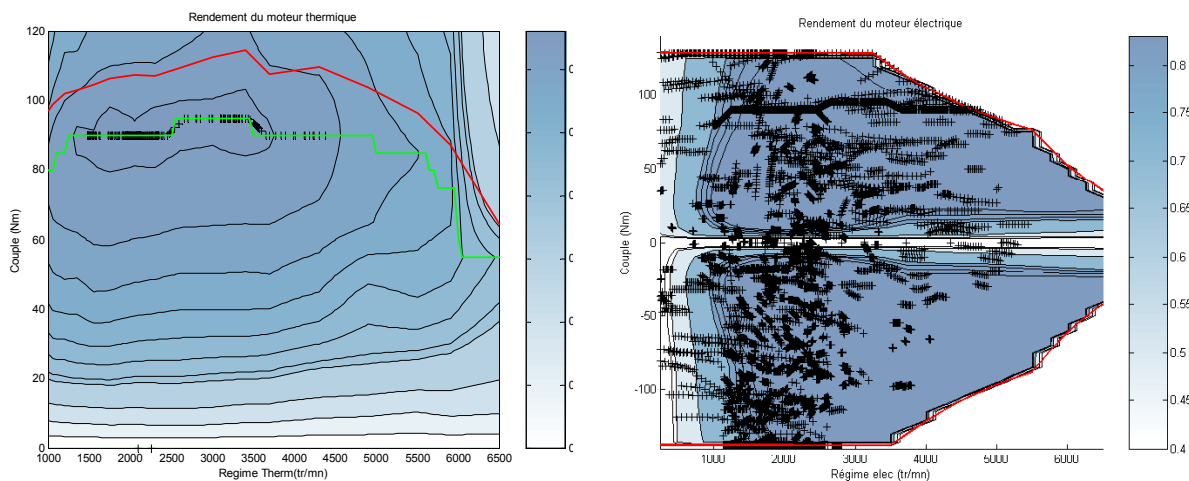


Figure 65 : Points de fonctionnement des deux moteurs pour le cycle Routier n°1 avec la stratégie Couple Opti

Les points de fonctionnement choisis pour le moteur thermique sont tous positionnés sur la courbe de couple optimal, figure 65. Le moteur électrique apporte donc le complément de couple nécessaire à la propulsion. Il est donc généralement fortement sollicité.

Nous disposons à présent de plusieurs stratégies applicables en temps réel. Parmi l'ensemble des algorithmes existants, il est alors souhaitable de pouvoir sélectionner un ensemble de stratégies de commande intéressantes, potentiellement, la ou les « meilleure(s) » stratégie(s). Il reste à s'entendre sur la définition des termes « intéressante », « meilleure ». Quels sont les critères d'évaluation ? comment réaliser un classement ? Les critères peuvent être de nature diverse : reliés aux performances du véhicule (émissions de polluants, consommation, etc.), subjectifs (agrément de conduite) ...

4.4. Evaluation des stratégies

Le critère principalement retenu dans cette étude est la consommation de carburant. Néanmoins il est également nécessaire de faire attention à la qualité d'une solution, i.e. prendre en compte les temps de calculs (si ceux-ci deviennent prohibitifs en temps réel), signaux de commande réalistes (fatigue des actionneurs), etc. Tous les résultats donnés dans la suite tiennent compte de ce souci de qualité de la solution.

4.4.1. Principe

Comme il a été indiqué à plusieurs endroits de ce mémoire, une stratégie de commande doit prendre en compte deux sources d'énergie différentes. Leur évaluation devra donc également tenir compte de ces deux sources d'énergie. Remarquons, que dans la littérature, les consommations de carburant sont données parfois sans même tenir compte de la deuxième source d'énergie /Lin & al. 2001/, et que dans le cas contraire, elles sont données avec une variation globale d'état de charge $Soc(N) - Soc(0)$ fixée, souvent à 0 /Paganelli 1999/ /Johnson & al. 2000/. Cela correspond à une comparaison mono-critère alors que le problème est par nature bi-critère.

Rappelons que /Smokers & al. 1999/ proposent d'étudier la consommation de carburant comme une fonction de la variation globale d'état de charge, les résultats obtenus permettent alors de prendre en compte l'utilisation des deux sources d'énergies. Les différents critères qui seront mis en œuvre mettent à profit cette idée et seront décrits dans la suite.

Cette méthode nécessite de calculer la consommation de carburant pour un ensemble de variations globales d'état de charge. Pour les algorithmes d'optimisations, il suffit de fixer la

valeur de ΔSoc . Pour les stratégies temps réel, c'est un peu moins explicite, il s'agit d'ajuster la contrainte sur l'état de charge et parfois plusieurs essais sont nécessaires.

L'ensemble des résultats sera donc donné par rapport à un plan (variation globale d'état de charge, consommation de carburant). La première étape est de délimiter le contour de l'espace des solutions admissibles, figure 66.

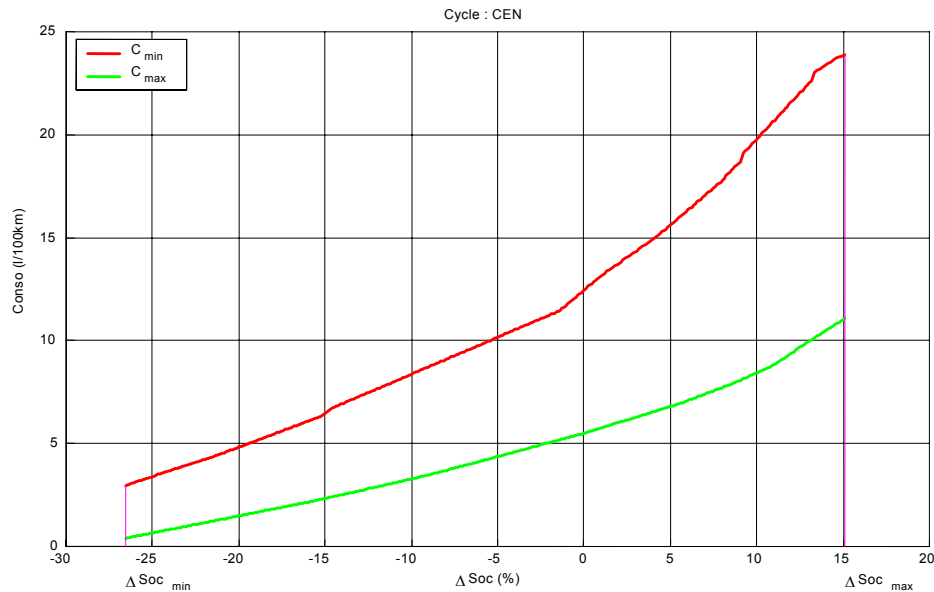


Figure 66 : Courbes de consommation minimale et maximale sur le CEN

Pour un cycle de vitesse donné, les variations globales d'état de charge possibles sont limitées : $\Delta Soc \in [\Delta Soc_{min}, \Delta Soc_{max}]$. Les deux bornes ΔSoc_{min} et ΔSoc_{max} correspondent respectivement au cas $C_{th}(t) = C'_{th_min}(t)$ et $C_{th}(t) = C'_{th_max}(t) \forall t \in [0..N-1]$.

En simulation, l'algorithme d'optimisation globale peut servir à calculer la consommation de carburant minimale en fonction de la variation globale d'état de charge notée $C_{min}(\Delta Soc)$. De même, en utilisant $-C(C_{th}(t), \omega_{th}(t))$, comme consommation de carburant, l'algorithme d'optimisation globale peut calculer la consommation maximale de carburant en fonction de la variation globale d'état de charge : $C_{max}(\Delta Soc)$.

La courbe correspondant au minimum de consommation est évidemment dépendante de l'algorithme d'optimisation considéré et des hypothèses faites (sur le modèle, la batterie etc.).

On rejoint donc les précautions prises sur les résultats de la commande basée sur la théorie de la commande optimale du précédent chapitre. Cependant, au vu des résultats obtenus, les résultats des stratégies de commande temps réel, représentés dans le plan consommation de carburant - variation globale d'état de charge sont tous compris entre les courbes $C_{\min}(\Delta Soc)$ et $C_{\max}(\Delta Soc)$, figure 66.

Ce contour dépend du cycle de vitesse choisi, on peut même le considérer comme une caractéristique propre au cycle.

4.4.2. Choix des cycles de vitesse

Il est alors intéressant de pouvoir dégager des cycles pour lesquels l'aire délimitée par ce contour est grande, permettant de grandes possibilités de variation inter stratégies. Effectivement, dans le cas contraire, i.e. aire « petite » le problème est tellement contraint qu'il n'y a que très peu de solutions possibles, et à l'extrême lorsque l'aire est nulle il n'y en a plus qu'une seule. Effectivement, ce cas correspond au véhicule en accélération maximale sur tout le cycle, donc quelle que soit la stratégie de commande utilisée, la seule consigne possible pour chacun des moteurs est le couple maximal : $C_{th}(t) = C_{th_max}(\omega_{th}(t))$ et $C_e(t) = C_{e_max}(\omega_e(t)) \forall t \in [0..N-1]$, il n'y a pas d'optimisation possible. La figure 67 illustre ce cas pour les stratégies LMS et ECMS.

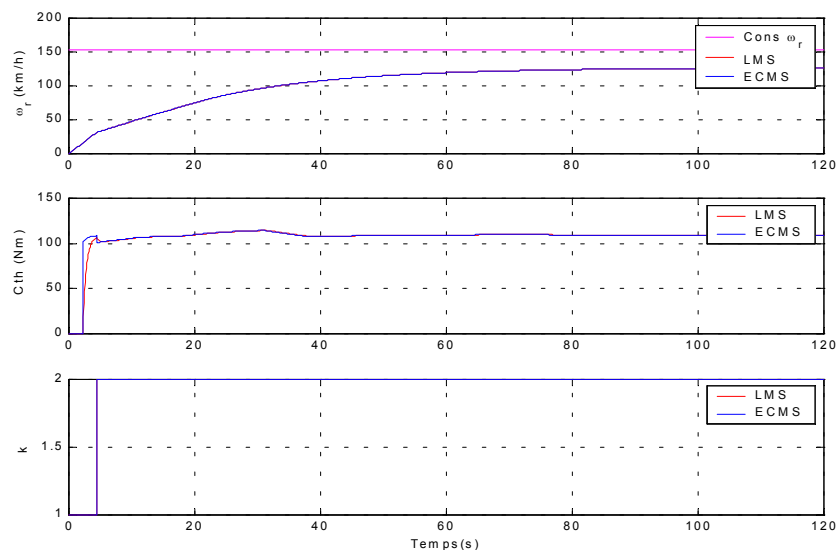


Figure 67 : Comparaison des résultats lors d'une accélération maximale

Dans ce cas, les courbes $C_{\min}(\Delta Soc)$ et $C_{\max}(\Delta Soc)$ se réduisent à un seul point, pour le Berlingo Hybride il s'agit du point $(1.83 l/100km, -24.9\%)$.

Afin de quantifier ce « degré de liberté » laissé aux stratégies de commande par un cycle de vitesse donné, le critère suivant est défini :

$$J_{cycle} \triangleq \frac{1}{\Delta Soc_{\max} - \Delta Soc_{\min}} \cdot \int_{\Delta Soc_{\min}}^{\Delta Soc_{\max}} (C_{\max}(\Delta Soc) - C_{\min}(\Delta Soc)) \cdot d\Delta Soc \quad (4.4)$$

avec : $C_{\min}(\Delta Soc)$ (respectivement $C_{\max}(\Delta Soc)$) : courbe de consommation minimale (respectivement maximale), obtenu par optimisation globale basée sur la théorie de la commande optimale.

Pour $J_{cycle} = 0$, on retrouve donc le cas précédent. A contrario, plus J_{cycle} est grand, plus les performances des stratégies de commande auront de l'influence sur la consommation de carburant.

Pour l'étude des stratégies de commande, six cycles de vitesse, figure 68, sont disponibles :

- Le Cycle Européen Normalisé : C'est le cycle utilisé par les constructeurs automobiles pour calculer la consommation moyenne d'un véhicule. C'est un cycle de vitesse artificiel constitué de quatre parcours identiques à faible vitesse suivis d'une portion plus rapide.
- Les cycles Urbain Fluide 2 à Autoroute 2 - Urbain Fluide 2 (UF2), Routier 1 et 3 (R1 & R3) Autoroute 1 et 2 (A1 & A2) - sont des cycles de vitesse qui ont été mesurés sur des véhicules lors de parcours réels et ils sont classés en fonction du type de parcours. Les premiers cycles sont typés parcours urbain (UF2 & R1) et varient graduellement jusqu'à arriver à une conduite sur route plus rapide (A1 & A2).
-
-

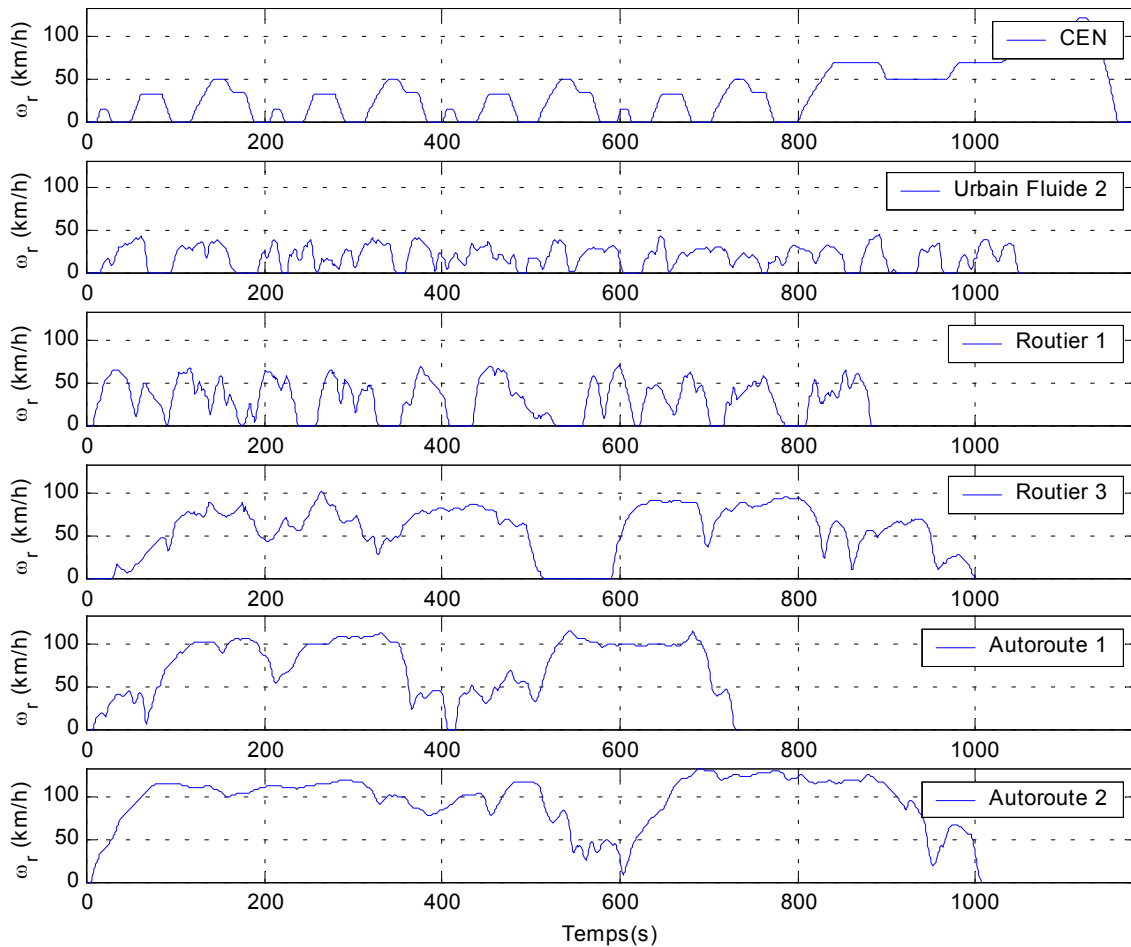


Figure 68 : Cycles utilisés pour l'évaluation des stratégies de commande

Le critère précédemment défini a alors été calculé sur ces différents cycles. L'aire délimitée par le contour des solutions admissibles dans le plan (consommation de carburant, variation globale d'état de charge) est représentée, figure 69. Le critère J_{cycle} peut être interprété comme l'écart moyen des courbes $C_{\min}(\Delta Soc)$ et $C_{\max}(\Delta Soc)$.

Remarque : une explication est nécessaire pour justifier que le cycle CEN ne sera plus pris en compte dans la suite. Effectivement, le critère présenté ne permet pas à lui seul de le rejeter. C'est un cycle artificiel, mais il présente l'avantage d'une interprétation des résultats très facile. Il a donc été la base du réglage des paramètres des différentes stratégies testées au cours de ce mémoire. Néanmoins, les résultats obtenus sont réellement très spécifiques au cycle proposé, il ne peut pas rendre compte du comportement global d'une stratégie. C'est déjà pour cette raison que le cycle R1 avait été utilisé pour illustrer les résultats des stratégies de commande dans le chapitre 2.

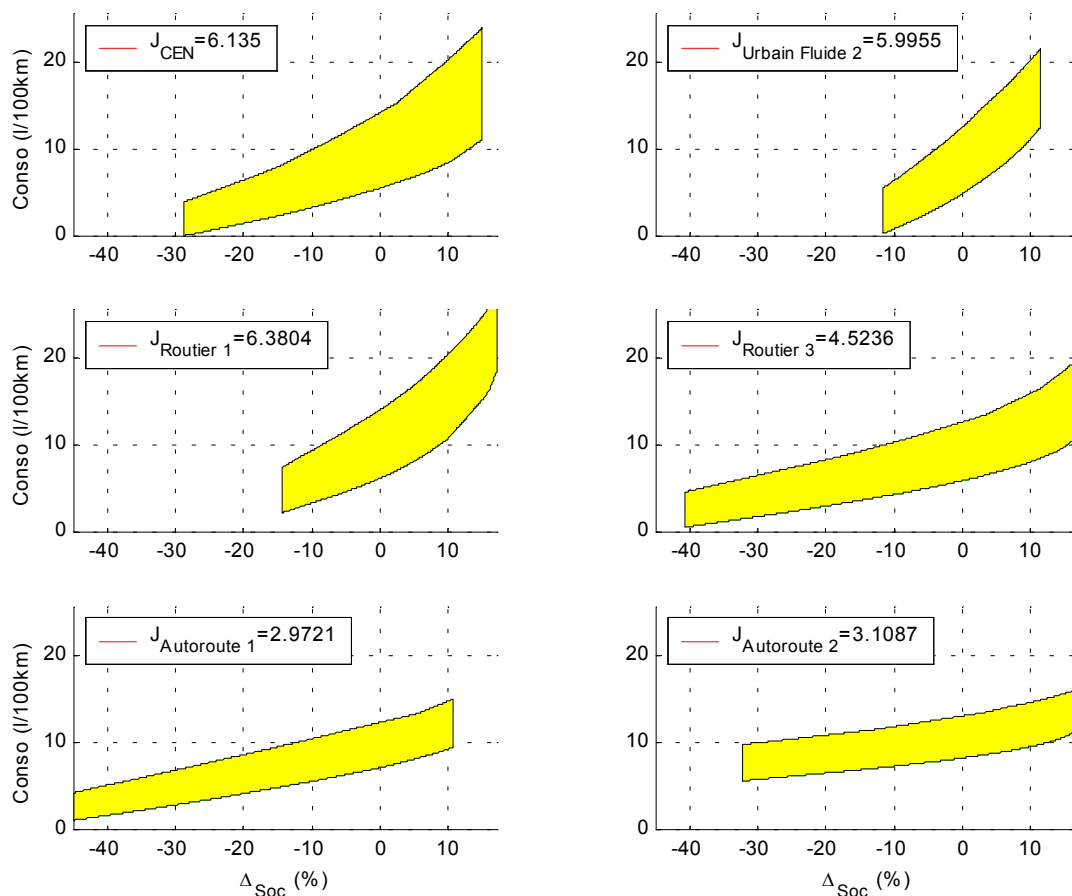


Figure 69 : Espaces des résultats réalisables par les stratégie temps réel pour chaque cycle

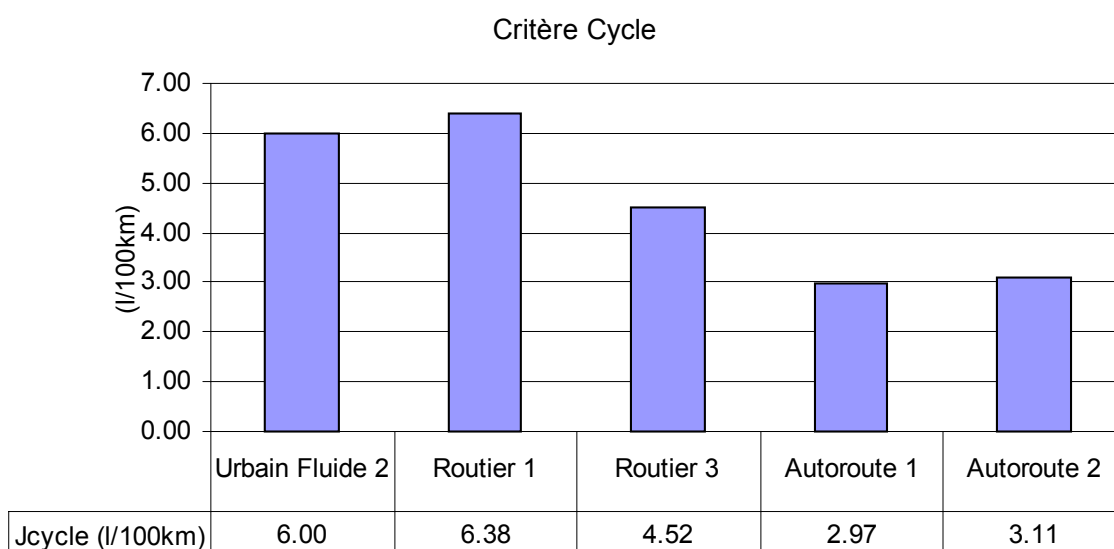


Figure 70 : Critères obtenus sur les cycles utilisés pour l'évaluation des stratégies de commande

Les valeurs obtenues montrent, figure 70, comme on pouvait s'y attendre que plus le cycle considéré s'effectue sur des portions rapides et plus l'ensemble des choix possibles pour les stratégies de commande est restreint.

A partir de ces résultats, les cycles peuvent alors être regroupés en fonction de la valeur du critère et les hypothèses suivantes sur les résultats des stratégies de commandes peuvent être émises :

- Cycles Urbain Fluide n°2 et Routier n°1 : l'écart de consommation entre la meilleure stratégie et la plus mauvaise $C_{\max}(\Delta Soc) - C_{\min}(\Delta Soc)$ est en moyenne de l'ordre de $6\text{ l}/100\text{ km}$. En considérant de plus, qu'ils correspondent à des cycles réalistes, il semble donc, que le degré de liberté laissé à la gestion de la répartition de puissance entre les deux moteurs soit important, i.e. c'est sur ces cycles que la variation inter stratégie devrait être la plus importante.
- Cycles Autoroute n°1 et n°2 : l'écart de consommation moyenne est de l'ordre de $3\text{ l}/100\text{ km}$. Le cas est donc opposé au premier, la puissance demandée aux roues étant relativement élevée, le degré de liberté laissé aux stratégies se trouve réduit.
- Cycle Routier n°3 : l'écart de consommation moyenne est de $4,5\text{ l}/100\text{ km}$ et correspond donc à un cas intermédiaire entre les deux précédents.

Dans toute la suite de ce chapitre, les résultats seront présentés en utilisant les stratégies suivantes :

- LMS : minimisation des pertes ;
- ECMS : minimisation de la consommation équivalente ;
- FCS : commande floue ;
- λ -control : exploitation temps réel de l'algorithme d'optimisation globale ;
- *CoupleOpti*.

Afin de valider les hypothèses proposés sur les cycles, les courbes de consommation de carburant en fonction de la variation globale d'état de charge sont représentées figure 71 pour les cinq stratégies de commande.

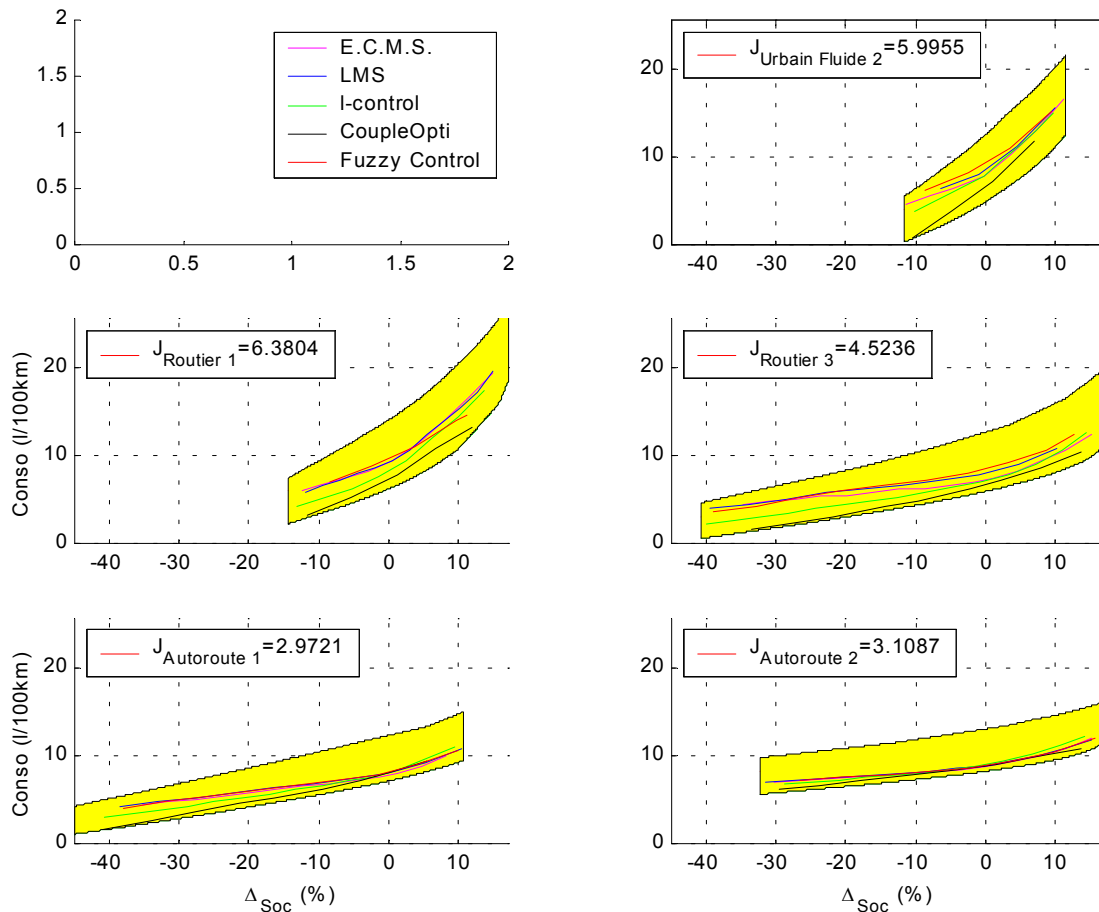


Figure 71 : Résultats pour les différentes stratégies de commande

Les différentes hypothèses sont confirmées, figure 71 : globalement il y a trois classes de cycles à étudier. Pour vérifier que le comportement des différents algorithmes testés soit relativement homogène sur l'ensemble des cycles, l'ensemble des simulations ne sera pas restreint au cycle le moins restrictif, mais sur trois cycles, un dans chaque classe, UF2, R3 et A1. En effet des réglages « trop particuliers » des stratégies de commandes aboutissent à de bons résultats sur certains cycles mais également à de très mauvaises performances sur les autres.

4.4.3. Evaluations des stratégies de commande

Comparer est toujours une tâche délicate, voire impossible. Parmi les points importants à relever :

- Le fait que les synthèses proviennent d'origines très diverses amène un nombre différent de paramètres à régler, souvent de nature très différente. Il n'est pas envisageable de concevoir une « méta-optimisation » des paramètres de chaque stratégie ;

- Un autre point qui n'est pas négligeable est le temps de développement d'un algorithme, bien qu'il soit difficile à évaluer, à cause du biais introduit par la connaissance préalable d'une méthode ;

On a essayé d'éviter autant que faire se peut, des biais trop importants, par exemple, le temps de développement de chaque méthode est resté raisonnable (aucune n'a été privilégiée).

Afin de synthétiser les performances de la stratégie *strat*, pour un cycle donné *cycle*, on définit le critère suivant $J_{strat}^{cycle} \in [0,1]$:

$$J_{strat}^{cycle} \triangleq \frac{\int_{\Delta Soc_{min}}^{\Delta Soc_{max}} (C_{strat}(\Delta Soc) - C_{min}(\Delta Soc)) d\Delta Soc}{J_{cycle} \cdot (\Delta Soc_{max} - \Delta Soc_{min})} \quad (4.5)$$

avec : $C_{strat}(\Delta Soc)$ la consommation de carburant de la stratégie *strat* pour une variation globale d'état de charge ΔSoc .

Plus (respectivement moins) une stratégie est performante plus $J_{strat}^{cycle} \rightarrow 0$ (respectivement $J_{strat}^{cycle} \rightarrow 1$). Les critères obtenus en utilisant les différentes stratégies de commande pour les trois cycles sélectionnés sont donnés figure 72.

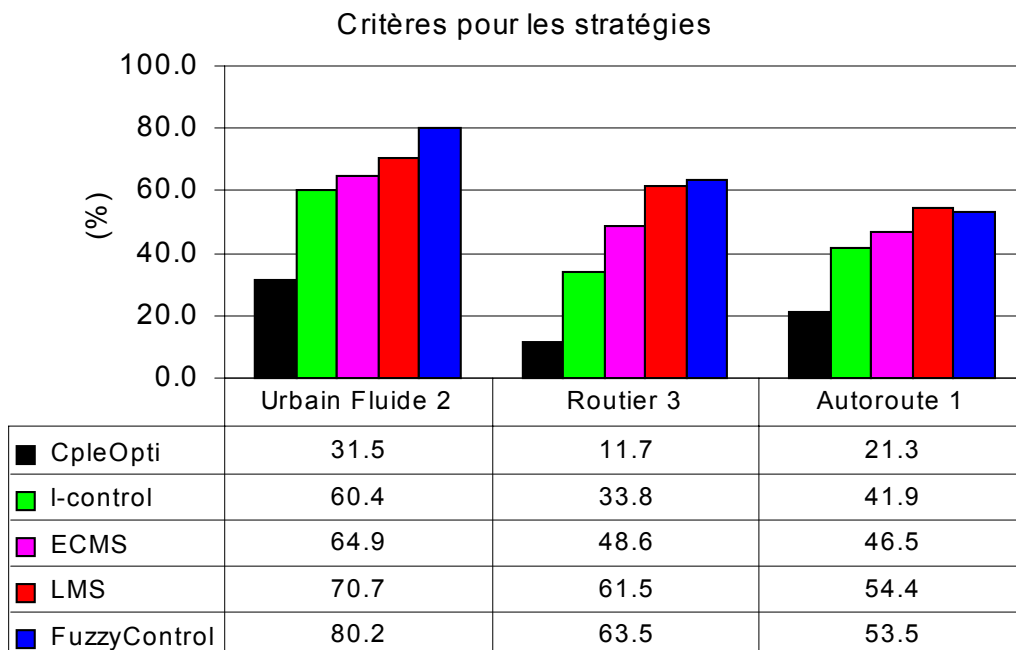


Figure 72 : Critères obtenus par les différentes stratégies en %

En terme de classement, la stratégie *CoupleOpti* obtient de bien meilleurs résultats, suivie par λ -control. Si la différence existant entre *CoupleOpti* et les autres stratégies est significative, il n'en va pas forcément de même pour la différence entre λ -control, et les autres. On préférera parler de tendance dans ce dernier cas, dans le sens où ce classement est fortement dépendant du réglage des paramètres.

En conclusion de cette partie, les constatations suivantes peuvent être faites :

- Les stratégies qui ont essayé d'analyser précisément les phénomènes énergétiques peuvent permettre de fournir une solution efficace (ECMS et LMS) et rapide (si on pense au cas de la régulation floue par exemple) ;
- Le passage de l'optimisation globale à la stratégie λ -control se fait sans difficulté en ayant de plus des performances très intéressantes, elle est de plus peu gourmande en temps de calculs et facilement paramétrable ;
- Enfin, et c'est peut être le plus étonnant, le fait d'analyser les résultats de l'algorithme d'optimisation globale basée sur la théorie de la commande optimale a permis de synthétiser une stratégie de commande très simple et très efficace qui se trouve être la meilleure sur le prototype considéré.

L'ensemble des outils développés nous permet d'aller plus amont dans la problématique des véhicules hybrides. La démarche peut tout à fait être envisagée sur des architectures différentes, voire être utilisée comme outil de dimensionnement des différents constituants d'un groupe motopropulseur.

4.5. Évaluation de différentes architectures

L'influence de l'architecture sur la consommation de carburant est difficile à évaluer. Les approches que l'on rencontre dans la littérature sont basées sur des estimations de rendement moyen pour chacun des composants du groupe motopropulseur /Beretta 2000/ ou, utilisent une stratégie de commande extrêmement simplifiée /Forgez & al. 2000/.

En simulation, l'algorithme d'optimisation globale moyennant quelques modifications (présentées annexe A) peut être réutilisé. Il permet alors d'évaluer de façon précise l'influence, d'une part de l'architecture et d'autre part des différents composants du groupe motopropulseur sur la consommation.

4.5.1. Groupes motopropulseurs testés

A titre d'illustration on se propose d'étudier différents groupes motopropulseurs de véhicules hybrides parallèle simple arbre et double arbre pouvant être construit avec trois moteurs électriques et trois moteurs thermiques différents. L'objet de l'étude étant uniquement la consommation de carburant, et non la réalisation d'un prototype, le dimensionnement et le choix des composants (moteur, boîte, batteries, etc.) ont été simplifiés.

Pour tous les prototypes, la batterie est constituée de modules de 11kg, 12V, 26Ah assemblés en série, similaires à ceux utilisés pour le Berlingo Hybride. Le nombre de modules est ajusté pour correspondre à la tension d'alimentation du moteur électrique. La capacité de la batterie varie dans le même sens que la puissance du moteur électrique utilisé.

Pour des raisons de simplicité de mise en œuvre, deux des trois modèles présentés ci-après correspondent à des moteurs asynchrones issus du logiciel Advisor /Advisor 2001/ :

- Moteur n°1 : machine asynchrone de 25kW, alimentée en 144V ;
- Moteur n°2 : moteur à courant continu à excitation séparée, de 43kW ;
- Moteur n°3 : machine asynchrone de 75kW, alimentée en 324V.

La puissance consommée par chacun des moteurs est donnée par des cartographies et intègre le rendement de l'électronique de puissance utilisée.

Le modèle de moteur thermique utilisé est celui présenté au premier chapitre. Il intègre une dynamique du premier ordre sur le couple et la consommation instantanée de carburant est estimée à partir d'une cartographie. Les trois moteurs utilisés sont :

- Moteur A : puissance maximale 40kW, soit environ 53CV ;
- Moteur B : Il s'agit du moteur TU3JP+ utilisé dans le Berlingo Hybride. Sa puissance maximale est de 55 kW soit environ 73CV ;
- Moteur C : Il s'agit du moteur TU5. Sa puissance maximale est de 67kW soit environ 90CV ;

Pour chacun des groupes motopropulseurs, le nombre de rapports ainsi que leur valeur sont ajustés de manière à ce que la courbe de couple maximal aux roues en fonction de la vitesse du véhicule (et donc les performances dynamiques du véhicule) soit similaire à celle du véhicule de référence, correspondant au Berlingo prototype.

Deux architectures sont étudiées : simple arbre et double arbre. Dans le cas du double arbre, une seule boîte de vitesses est utilisée. Elle est montée sur l'arbre du moteur thermique. Notons, que pour les architectures double arbre, le couple minimal disponible aux roues ne dépend que du moteur électrique utilisé et peut donc être différent de celui du véhicule de référence.

Le tableau, figure 73, donne les 16 possibilités exploitées en fonction des moteurs et du nombre de rapports de boîte, sachant que la combinaison A1 (moteur thermique de 40kW et moteur électrique de 25kW) n'est pas envisagée car les performances dynamiques du véhicule obtenues ne sont pas suffisantes.

Moteur	Simple arbre			Double arbre		
	1	2	3	1	2	3
A	xx	4	2	xx	5	3
B	3	2	2	5	3	2
C	3	2	2	4	3	2

Figure 73 : Nombre de rapports

Les combinaisons des différentes motorisations permettent de faire varier le taux d'hybridisation, i.e. rapport entre la puissance du moteur thermique et la puissance totale installée dans le véhicule /Beretta 2001/ de 25% à 65%, figure 74.

Taux d'hybridisation (%)	1	2	3
A	xx	52	65
B	31	44	58
C	25	36	50

Figure 74 : Taux d'hybridisation des différents groupes motopropulseurs

4.5.2. Résultats obtenus

L'algorithme d'optimisation a été appliqué à chacun des prototypes, pour les trois cycles précédemment définis, UF2, A1 et R3. Afin de pouvoir prendre en compte des batteries de capacité différente, la consommation d'énergie électrique est exprimée en Joules.

4.5.2.1. Architecture simple arbre

La figure 75 donne toujours dans un plan, variation globale d'état de charge, consommation minimale de carburant ($\Delta Soc, C$) la courbe de consommation minimale calculée par

l'algorithme d'optimisation globale intégrant la gestion du moteur thermique pour chaque groupe motopropulseur C_{\min}^{Xi} , $X \in \{A, B, C\}$, $i \in \{1, 2, 3\}$. Pour éviter de surcharger le chapitre seules quelques courbes synthétiques sont données. Le choix des points de fonctionnement pour les deux moteurs sont donnés en Annexe B pour toutes les configurations étudiées.

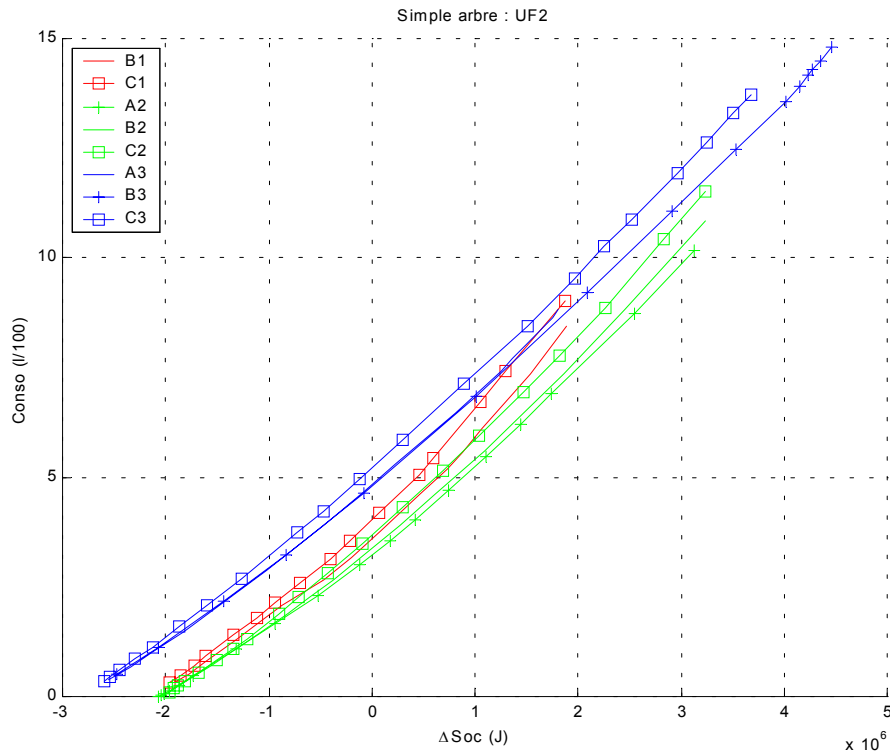


Figure 75 : Résultats pour les prototypes simple arbre sur le cycle Urbain Fluide n°2

Pour le cycle UF2, le moteur électrique influence principalement les performances du véhicule. Le couple du moteur thermique est principalement positionné dans sa zone de couple optimal. Ainsi, pour un moteur thermique donné, pour les moteurs électriques n°1 et 2, les consignes de couple thermique sont relativement similaires. La différence de consommation provient alors de la différence de rendement de la chaîne de traction électrique. Le meilleur rendement étant celui du moteur électrique n°2, les meilleures consommations de carburant sont obtenues avec les groupes motopropulseurs utilisant ce moteur.

Le moteur électrique n°1 ayant une faible puissance, l'utilisation du moteur thermique est beaucoup plus contraint par la demande de couple aux roues, l'algorithme d'optimisation n'a alors qu'une faible marge de manœuvre pour optimiser la consommation de carburant.

Le moteur thermique A ayant une plus petite puissance, son rendement pour de faibles couples est meilleur que le moteur B. En comparaison avec les moteurs A et B, le rendement

du moteur C est plus faible à bas régime, sur ce cycle relativement lent, les consommations de carburant sont donc plus élevées que pour les deux autres moteurs.

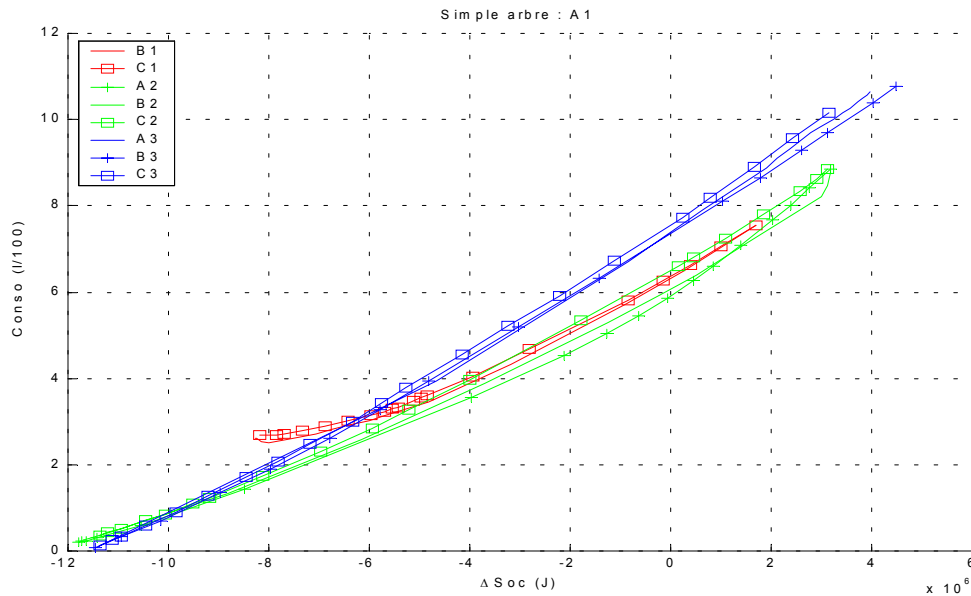


Figure 76 : Résultats pour les véhicules simple arbre et le cycle de vitesse Autoroute n°1

Les mêmes essais ont été menés sur le cycle Autoroutier n°1 (A1), figure 76. Les résultats sont globalement les mêmes, mis à part pour les véhicules équipés d'un moteur électrique n°1. Pour les prototypes équipés du moteur électrique n°1, le moteur thermique peut être plus souvent positionné dans sa zone de meilleur rendement sans que le couple du moteur électrique soit saturé (saturation inférieure $C_{e_min}(\omega_e(t))$) car la puissance demandée aux roues est plus importante que pour le cycle UF2.

Pour le dernier cycle, R3, les phénomènes observés sont beaucoup moins intéressants et ne sont pas présentés.

4.5.2.2. Architecture double arbre

Les résultats obtenus avec les véhicules équipés d'une architecture double arbre pour le cycle UF2, sont donnés figure 77 et pour le cycle A1, figure 78.

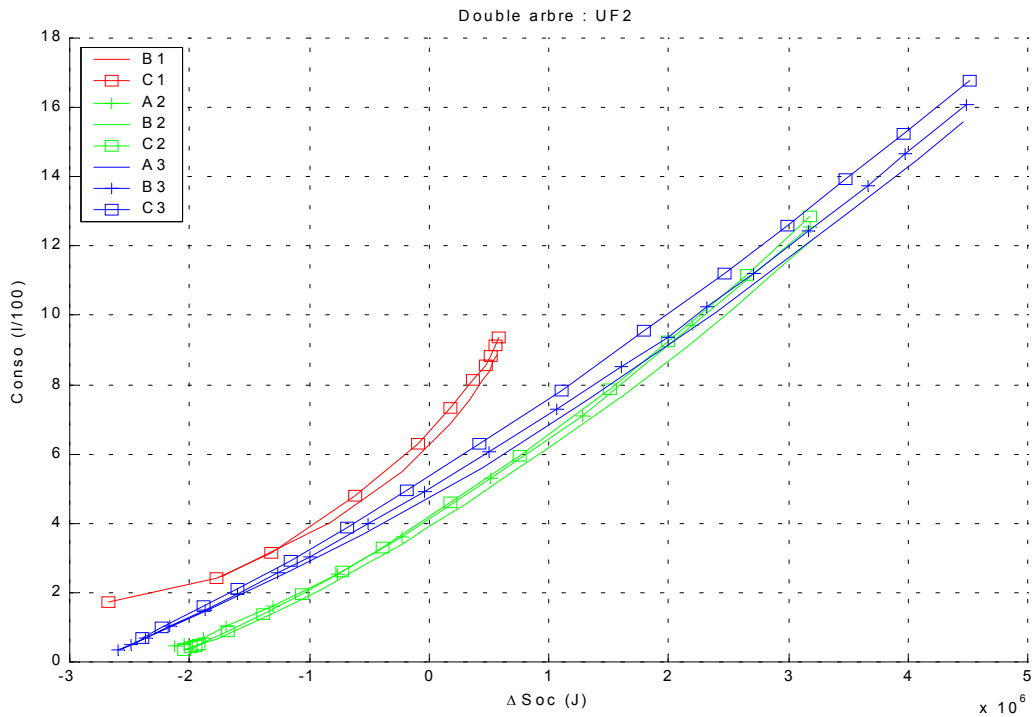


Figure 77 : Résultats des architectures double arbres sur le cycle Urbain n°2

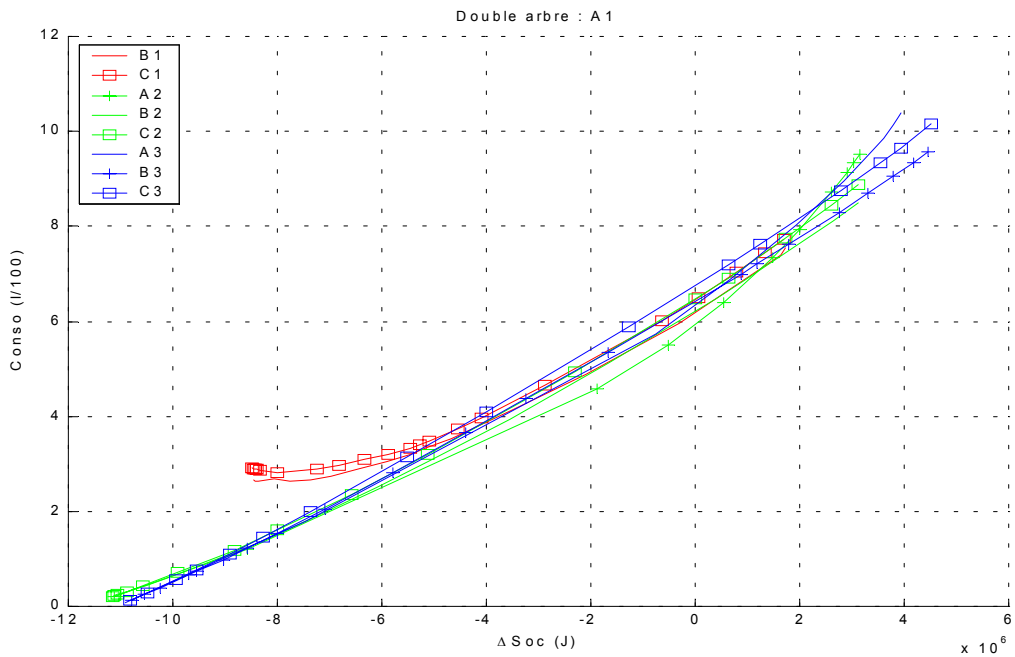


Figure 78 : Résultats des véhicules double arbres pour le cycle Autoroutier n°1

Dans l'architecture double arbre étudiée, le moteur électrique est relié aux roues à travers un simple réducteur, et donc sa contribution à la propulsion du véhicule, est donc plus limitée que pour un simple arbre. D'une manière générale, pour les moteurs électriques n°1 et 2 et un

moteur thermique donné, les consommations obtenues avec une architecture double arbre sont plus élevées que celles obtenues avec l'architecture simple arbre. La puissance importante du moteur électrique n°3 n'est réellement exploitée que dans l'architecture double arbre. Quelle que soit l'architecture, la faible puissance du moteur électrique n°1 ne permet pas de positionner le point de fonctionnement du moteur thermique dans des zones de bon rendement et les consommations de carburant sont plus importantes que pour les autres moteurs.

4.5.3. Critère synthétique de performance

Afin d'évaluer, de manière synthétique les performances des prototypes évalués, un critère synthétique est proposé. Soit $C_{hyp}(\Delta Soc)$ la consommation, sur un cycle de vitesse donné, pour une variation d'état de charge ΔSoc (exprimée en J), d'un véhicule « idéal » équipé d'une chaîne de traction électrique et de transmissions idéales (aucune pertes), et d'un moteur thermique se résumant à la consommation spécifique minimale $Cspe_{min}$ pour tous les points (i.e., un moteur à rendement « idéal »):

$$C_{hyp}(\Delta Soc) \triangleq \frac{1}{Cspe_{min}} \left(\int_{t=0}^N C_r(t) \cdot \omega_r(t) dt - \Delta Soc \right) \quad (4.6)$$

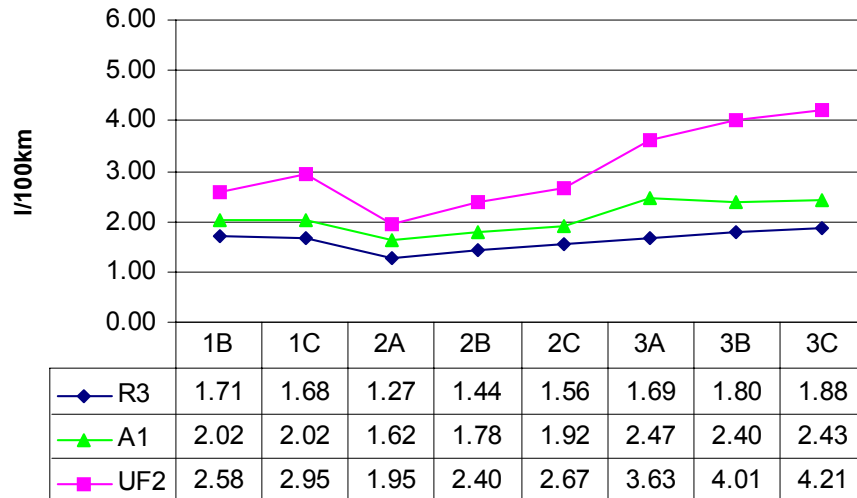
Le critère de performance proposé d'un véhicule sur un cycle est alors :

$$J_{veh} \triangleq \frac{1}{\Delta Soc_{max} - \Delta Soc_{min}} \cdot \int_{\Delta Soc_{min}}^{\Delta Soc_{max}} (C_{min}(\Delta Soc) - C_{hyp}(\Delta Soc)) \cdot d\Delta Soc \quad (4.7)$$

J_{veh} peut être interprété, pour un cycle donné, comme la différence moyenne de consommation de carburant entre le véhicule étudié et le véhicule « idéal » correspondant.

Les critères ont été calculés pour les trois cycles : UF2, R3 et A1, en croisant tous les différentes combinaisons de groupes motopropulseurs, figure 79, et les résultats précédemment cités se retrouvent sur cette figure.

Simple arbre



Double arbre

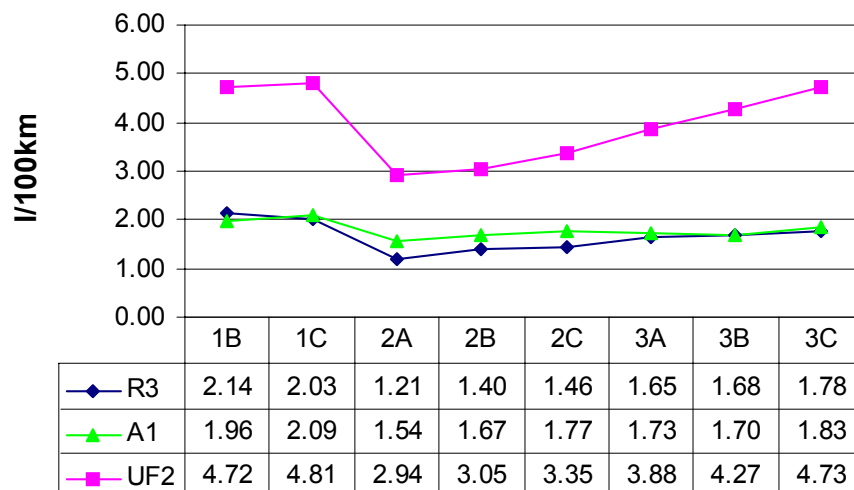


Figure 79 : Critères pour les différents prototypes évalués

4.6. Conclusion

Ce chapitre a permis d'aborder différents problèmes rencontrés lors de l'étude d'algorithmes destinés à l'application temps réel. En premier lieu, un algorithme d'estimation de l'état de charge d'une batterie au plomb a été proposé. Il ne nécessite pas de moyens d'expérimentation lourds et semble suffisant pour l'application considérée.

Le deuxième chapitre avait fourni plusieurs stratégies de commande temps réel. Trois de ces stratégies ont été reprises et deux nouvelles proposées. La première est issue de l'adaptation

de l'algorithme d'optimisation globale du chapitre précédent. La seconde a été synthétisée à partir de l'analyse des résultats de l'optimisation globale.

Ensuite, au travers de la définition de plusieurs critères, l'évaluation de ces stratégies de commande a été réalisée, en termes de consommation de carburant sur plusieurs cycles sélectionnés.

Enfin, l'utilisation des algorithmes d'optimisation globale comme outils d'aide à la conception et à l'évaluation des groupes motopropulseurs a été illustrée.

Conclusion générale

Le principal objectif de ce travail avait pour but de comparer et d'évaluer des stratégies de commande temps réel pour véhicule hybride. Après une rapide étude des architectures classiques, seules les architectures parallèles ont été retenues dans la suite des travaux. Une attention particulière a été attachée à l'étude d'un prototype hybride parallèle simple arbre conçu au LAMIH. Le modèle de ce véhicule a servi de base à la plupart des simulations présentées dans ce mémoire.

Une étude des principales stratégies de commande a alors été réalisée. On peut la résumer de la manière suivante :

L'absence de modèles fiables des différents organes et un souci de rapidité a amené un certain nombre d'auteurs à proposer des stratégies de commande basées sur l'expertise préalablement acquise. Cependant, le reproche principal est inhérent à ce type de méthodes : la généralisation à d'autres architectures, voire à d'autres véhicules, est quasi impossible en raison du grand nombre de paramètres à régler.

Un autre type d'approche consiste à analyser finement les flux énergétiques. Deux voies ont été explorées dans ce sens. La première est basée sur la minimisation des pertes dans le groupe motopropulseur /Seiler & Schröder 1998/, la seconde met en œuvre une consommation équivalente /Paganelli 1999/. Ces deux stratégies peuvent être considérées comme allant dans le sens d'une minimisation instantanée de la consommation de carburant, la variation d'état de charge est alors interprétée comme une contrainte globale.

Afin de disposer de résultats pouvant servir de référence pour l'évaluation des stratégies de commande temps réel, il a été décidé de formuler la problématique de la répartition de puissance entre les deux chaînes de traction comme un problème d'optimisation globale sous contraintes. Plusieurs méthodes ont été envisagées dont certaines sont basées sur la théorie de la commande optimale. Elles permettent de concilier temps de calcul et qualité des solutions obtenues.

Ces algorithmes ont permis de dégager une première stratégie de commande temps réel, λ -control. Une seconde stratégie a pu être proposée sur la base de l'expertise issue des résultats des algorithmes d'optimisation globale.

Les comparaisons entre toutes ces méthodes se faisant, en simulation, sur des cycles de vitesse donnés, un critère permettant de caractériser ces derniers a été proposé. Il a permis de sélectionner trois cycles particuliers. L'analyse des résultats montre que quatre stratégies donnent des performances similaires : λ -control, ECMS, LMS, FCS avec une légère préférence pour la première.

L'observation des résultats de la commande optimale montre que le couple du moteur thermique est toujours positionné près de son couple optimal, dans la zone où son rendement est maximal. Cette observation associée à la gestion de l'état du moteur thermique a permis de proposer la stratégie *CoupleOpti*. Les résultats obtenus sont très proches de ceux obtenus par la commande optimale, et par conséquent cette stratégie temps réel (se résumant à deux règles !!!), est très performante pour la minimisation de la consommation de carburant.

Glossaire

Architecture de véhicule : L'architecture d'un véhicule hybride désigne la manière dont les différents composants du groupe motopropulseur sont agencés.

Chaîne de traction : Une chaîne de traction est l'ensemble des composants situés entre une source d'énergie et les roues.

Consommation spécifique : Pour un point de fonctionnement donné, la consommation spécifique du moteur thermique est égale à la consommation instantanée de carburant divisée par la puissance mécanique produit sur l'arbre du moteur thermique. Elle est proportionnelle à l'inverse du rendement du moteur thermique.

Cycle de vitesse : C'est une consigne de vitesse exprimé en fonction du temps. Par exemple, le Cycle Européen Normalisé est le cycle de vitesse utilisé par les constructeur d'automobiles européens pour calculer la consommation moyenne des véhicules.

Etat de charge Soc : Quantité d'énergie contenue dans la batterie. Par convention lorsque la batterie est pleine $Soc = 0$ et lorsqu'elle est vide $Soc = 1$. L'état de charge est souvent exprimé en pour-cent.

Groupe motopropulseur : Ensemble des organes *mécanique* par lesquels transite l'énergie nécessaire à la propulsion du véhicule.

Loi de pédale : La loi de pédale est l'algorithme qui interprète la position de la pédale d'accélérateur en demande de couple ou en demande de puissance aux roues.

Mode électrique pur : Dans ce mode de fonctionnement, la propulsion du véhicule est assurée uniquement par le moteur électrique.

Mode hybride : Dans ce mode de fonctionnement, la propulsion du véhicule est assurée par les deux moteurs simultanément.

Stratégie de commande : Les stratégies de commande sont des algorithmes d'optimisation qui calculent à chaque instant la répartition de puissance entre le moteur électrique et le moteur thermique.

Variation globale d'état de charge : ΔSoc . C'est la différence de l'état de charge de la batterie entre le début et la fin du cycle. $\Delta Soc = x(N) - x(0)$. Elle est souvent exprimé en pour-cent.

Véhicule conventionnel : Un véhicule conventionnel est un véhicule dont la propulsion est intégralement assurée par un moteur thermique.

Véhicule hybride : Un véhicule hybride est un véhicule qui met en œuvre au minimum deux sources d'énergie pour assurer sa propulsion dont, une au moins, est réversible.

Bibliographie

- /Advisor 2001/ Logiciel de simulation de véhicules hybrides pour Matlab/Simulink, disponible sur Internet : <http://www.ctts.nrel.gov/analysis/>
- /Arnet & Haines 2001/ B. J. Arnet, L. P. Haines, *Combining Ultra-Capacitors with Lead-Acid Batteries*, Electric Vehicle Symposium EVS 17, Montréal, Octobre 2000.
- /Avere 2001/ European Electric Road Vehicle Association, <http://www.averse.org>
- /Anderson & al. 1999/ J. Anderson, R. Axelsson, B. Jacobson, *Route adaptation of control strategies for a hybrid city bus*, JSAE Review n°20, p513-536, 1999.
- /Badin & al. 2001/ F. Badin, B. Jeanneret, R. Trigui, F. Harel, *Hybrid Vehicles, should we plug them to the grid or not ?*, Electric Vehicle Symposium EVS 18, Berlin, Octobre 2001.
- /Barbier & al. 1994/ C.E. Barbier, B. Nogarede, H.L. Meyer, S. Bensaoud, *A battery state of charge indicator for electric vehicl*, Note interne laboratoire MIRGAS, Toulouse, 1994.
- /Bartlett & Whalley 1998/ H. Bartlett, R. Whalley, *Modelling and analysis of variable geometry exhaust gas systems*, Applied Mathematical Modelling n°22, p545-567, 1998.
- /Beretta 1998/ J. Beretta, *New classification on electric-thermal hybrid vehicles*, Electric Vehicle Symposium EVS 15, Bruxelles, Octobre 1998.
- /Beretta 2000/ J. Beretta, *New tools for energy efficiency evaluation on hybrid architecture*, Electric Vehicle Symposium EVS 17, Montréal, Octobre 2000.
- /Bonnemoy & Hamma 1991/ C. Bonnemoy, S.B. Hamma, La méthode d'optimisation du recuit simulé : Optimisation globale dans \mathfrak{R}^n , APII, vol n°25, p447-496, 1991.
- /Borne & al 1990/ P. Borne, G. Dauphin-Tanguy, J.P. Richard, F. Rotella, I. Zambettakis, *Commande et optimisation des processus*, Méthodes et techniques de l'ingénieur, Éditions Technip, 1990.
- /Brahma & al. 2000/ A. Brahma, Y. Guezennec, G. Rizzoni, *Optimal Energy Management in Series Hybrid Vehicles*, Proceedings of the American Control Conferences, Chicago, Juin 2000.

- /Brassart 2001/ R. Brassart, *Estimation de l'état de charge des batteries – Stratégie de commande pour véhicule hybride double arbre*, Rapport de DEA, Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielles et Humaines, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2001.
- /CCFA 2001/ Comité des constructeurs Français d'Automobile, *Analyse et statistiques l'industrie automobile française*, Edition 2001, disponible sur Internet : <http://www.ccfa.fr>
- /Combes 2000/ E. Combes, *Citroen XSARA DYNACTIVE*, Electric Vehicle Symposium EVS 17, Montréal, Octobre 2000.
- /Delprat 1999/ S. Delprat, *Mise au point d'un outil d'évaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides*, Rapport de DEA, Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielles et Humaines, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2001.
- /Delprat & al. 1999/ S. Delprat, G. Paganelli, T.M. Guerra, J.J. Santin, M. Delhom, E. Combes, *Algorithmic optimization tool for the evaluation of HEV control strategies*, Electric Vehicle Symposium, EVS16, Pékin, (Chine), Octobre 1999.
- /Delprat & al. 2001/ S. Delprat, T.M. Guerra, G. Paganelli, J. Lauber, M. Delhom, *Control strategy optimization for an hybrid parallel powertrain*, ACC 2001, Washington D.C, (USA), Juin 2001.
- /Delprat & al. 2000/ S. Delprat, T.M. Guerra, J. Lauber, G. Paganelli, S. Rimaux, E. Combes, *Optimal control theory applied to a parallel hybrid powertrain*, ISATA 2000 Automotive & transportation technology, p243-251, Dublin, (Irlande), Septembre 2000.
- /Frank 2001/ A.A. Frank, *Drive System Analysis and Optimization for Plug-In Hybrid Electric Vehicles*, Electric Vehicle Symposium EVS 18, Berlin, Octobre 2001.
- /Forgez & al. 2000/ C. Forgez, G. Friedrich, J.M. Biedinger, *Method to find the hybridization rate for a parallel hybrid electrical vehicle*, Electric Vehicle Symposium EVS 17, Montréal, Octobre 2000.
- /Furubayashi & al. 2001/ M. Furubayashi, Y. Ushio, E. Okumura, T. Takeda, D. Andou, H. Shibuya, *Application of High Power Super Capacitors to an Idling Stop System for City Buses*, Electric Vehicle Symposium EVS 18, Berlin, Octobre 2001.
- /Garcia & Bernussou 1998/ G. Garcia, J. Bernussou, *Identification of the dynamics of a lead acid battery by a diffusive model*, LAAS Report 98506, Novembre 1998.
- /Ingber 1989/ A.L. Ingber, *Very Fast Simulated Re-Annealing* Journal of Mathematical Computation Modelling, n°12, p 967-973, 1989.
- /Johnson & al 2001/ V.H. Johnson, K.B. Wipke, D.J. Rausen, *HEV Control Strategy for Real-Time Optimization of Fuel Economy and Emissions*, Futur Car Congress, Avril 2000.

- /Kleimaier & Schröder 2001/ A. Kleimaier, D. Schröder, *The autark Hybrid Vehicle : Optimal Engine Operation*, Electric Vehicle Symposium EVS 18, Berlin, Octobre 2001.
- /Kok & al. 2001/ D. Kok, E. Spijker, A. Seibertz, S. Buller, *42V Energy Storage Systems for Stop-Start Application in Hybrid Vehicles*, Electric Vehicle Symposium EVS 18, Berlin, Octobre 2001.
- /Lin & al. 2001/ C.C. Lin, J.M. Kang, J.W. Grizzle, H. Peng, *Energy Management Strategy for a Parallel Hybrid Electric Truck*, Proceedings of the American Control Conferences, Arlington, Juin 2001.
- /Lynch & al. 2001/ S. Lynch, T. Balon, L. Callaghan, *DARPA/DOT Hybrid-Electric Drive Transit Bus Chassis and Engine Emission Evaluation Programs*, Electric Vehicle Symposium EVS 18, Berlin, Octobre 2001.
- /Magyar & al. 1990/ J.A. Magyar, M.A. Kepros, R.F. Nelson, *Reference electrode and gasing studies of lead acid charge/discharge processes*, Journal of Power Sources, n°31, p 93-106, 1990.
- /Martellucci & al. 2001/ L. Martellucci, M. Santoro, C. Boccaletti, *A Power Train with Planetary Gear System : Advantages and a Design Approach*, Electric Vehicle Symposium EVS 18, Berlin, Octobre 2001.
- /Martin 2001/ A. Martin, *Progress of fuel cell technology allows for different fuel options*, Electric Vehicle Symposium EVS 18, Berlin, Octobre 2001.
- /Mellor & al. 2000/ P.H. Mellor, N. Schofield, A.J. Brown, D. Howe, *Assessment of supercapacitor/Flywheel and battery EV traction system*, ISATA 2000, p235-242, session 'Electric/Powertrain', Dublin, Septembre 2000.
- /Moretti 1999/ A. Moretti, *The new electric vehicule 'Renault Kangoo'*, Electric Vehicle Symposium EVS 17, Montréal, Octobre 2000.
- /Müller-Hellmann 2001/ A. Müller-Hellmann, *Clean and Comfortable Public Transportation – a Vision into the Future*, Electric Vehicle Symposium EVS 18, Berlin, Octobre 2001.
- /Paganelli 1999/ G. Paganelli, *Conception et commande d'une chaîne de traction optimisée pour véhicule hybride parallèle thermique et électrique*, Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes, Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielles et Humaines, 1999.
- /Paganelli & al. 2000/ G. Paganelli, T.M. Guerra, S. Delprat, J.J. Santin, M. Delhom, E. Combes, *Simulation and assessment of power control strategies for a parallel hybrid car*, Journal of automobile engineering, IMechE, SAE International IEE, n°214, p 705-718, 2000.
- /Pang & al. 2001/ S. Pang, J. Farrell, J. Due, M. Barth, *Battery state of charge estimation*, Proceedings of the American Control Conferences, Arlington, Juin 2001.

- /Pera & al. 2001/ M.C. Pera, D. Hissel, J.M. Kauffmann, *Fuel Cell systems for Electrical Vehicule*, IEEE 54th Vehicular Technology Conference, Atlantic City, Octobre 2001.
- /Pusca & al. 2001/ R. Pusca, Y. Ait-Amirat, *Fuzzy logic based control for electric vehicle with four separate traction drives*, IEEE 54th Vehicular Technology Conference, Atlantic City, Octobre 2001.
- /Rimaux & al. 1999/ S. Rimaux, M. Delhom, E. Combes, *Hybrid Vehicle Powertrain : Modeling and Control*, Electric Vehicle Symposium EVS 16, Peking, Octobre 1999.
- /Salman & al. 2001/ M. Salman, N.J. Schouten, N.A. Kheir, *Control Strategies for Parallel Hybrid Vehicle*, Proceedings of the American Control Conferences, Chicago, Juin 2000.
- /Seiler & Schröder 1998/ J. Seiler, D. Schröder, *Hybrid vehicle operating strategies*, Electric Vehicle Symposium EVS15, Bruxelles, 1998.
- /Selzer & al. 2000/ H. SELZER, C. AMENT, M. SORG, Electric storage system for great mileage and high acceleration, ISATA 2000, p333-340, session 'Electric/Powertrain', Dublin, Septembre 2000.
- /Simard & Johnson 2000/ G. Simard, D. Johnson, *Power Inverter design for Motor-Wheel application*, ISATA 2000, p269-278, session 'Electric/Powertrain', Dublin, Septembre 2000.
- /Smokers & al. 1999/ T.M. Smokers, S. Ploumen, M. Conte, L. Buning, K. Meier-engel, *Solving measurement and evaluation problems in the development of test procedures for vehicle with electric, hybrid and fuel cell powertrains*, Electric Vehicle Symposium, EVS16, Pékin, 1999.
- /Sonnenburg & Hallen 2000/ R. Sonnenburg, M. Van Hallen, *The design of permanent magnet-excited crankshaft starter-alternators*, ISATA 2000, p269-278, session 'Electric/Powertrain', Dublin, Septembre 2000.
- /Stridsberg 2001/ L. Stridsberg, *Clutch Configured Serial/Parallel Hybrid*, Electric Vehicle Symposium EVS 18, Berlin, Octobre 2001.
- /Piller & al. 2001/ S. Piller, M. Perrin, A. Jossen, *Methods for state-of-charge determination and their applications*, Journal of Power Sources n°96, p113-120, 2001.
- /Tian & al. 2001/ G. Tian, L. Zhao, H. Li, X. Han, Q. Chen, *Determination of power train component specifications of a SHEV light bus based on energy flow analysis*, Electric Vehicle Symposium EVS 18, Berlin, Octobre 2001.
- /Van Mierlo & al. 2001/ J. Van Mierlo, G. Maggetto, Kleimaier, *Models of Energy Sources for EV and HEV : Fuel cells, Batteries, Ultra-Capacitors, Flywheels and Enginegenerators*, Electric Vehicle Symposium EVS 18, Berlin, Octobre 2001.
- /Van Mierlo 2000/ J. Van Mierlo, *Simulation of a complex parallel-series hybrid drive train*, Electric Vehicle Symposium EVS 17, Montreal, Octobre 2000.

- /Wiegman & Lorenz. 1998/ H.N.L. Wiegman, R.D. Lorenz, *High efficiency battery state control and power capability prediction*, Electric Vehicle Symposium EVS 15, Pékin, Chine, Octobre 1998.
- /Won & Langari 2001/ J.S. Won, R. Langari, *Fuzzy Torque Control for a Parallel Hybrid Vehicle*, proposé pour International Mechanical Engineering Conference and Exposition, IMECE 2001.
- /Zhang & Chen 2001/ R. Zhang, Y. Chen, *Control of Hybrid Dynamical Systems for Electric Vehicle*, Proceedings of the American Control Conferences, Arlington, Juin 2001.

Annexes

Annexe A : Formulation du problème d'optimisation pour l'architecture parallèle double arbre

Dans cette étude, l'architecture hybride parallèle double arbre considérée est celle représentée figure 80 /Brassart 2001/. La boîte de vitesses relie les roues et le moteur thermique. Le réducteur permet d'une part d'accoupler le moteur électrique aux roues et d'autre part d'ajuster son régime à celui du véhicule. Généralement, son rapport de réduction est calculé de manière à ce que le moteur électrique et le véhicule atteignent leur vitesse maximale simultanément.

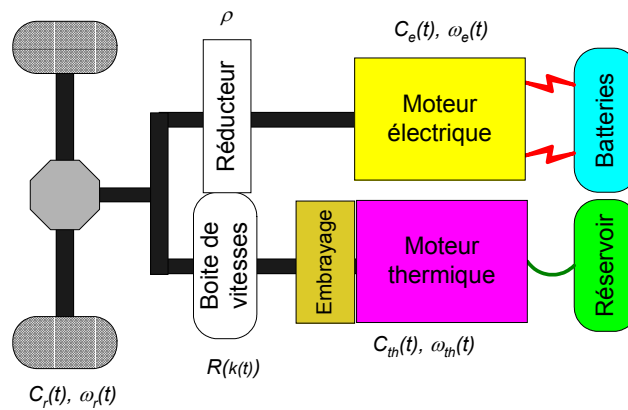


Figure 80: L'architecture hybride parallèle double arbre

Les relations mécaniques décrivant cette architecture sont les suivantes :

Pour les couples :
$$C_r(t) = R(k(t)) \cdot \eta_{bv} \cdot C_{th}(t) + \rho \cdot C_e(t) \cdot \eta_{red} \quad (A.1)$$

Pour les régimes :
$$\omega_r(t) = \frac{\omega_{th}(t)}{R(k)} = \frac{\omega_e(t)}{\rho} \quad (A.2)$$

Les limitations mécaniques sont les mêmes que pour le véhicules simple arbre :

Pour le moteur thermique :
$$\omega_{th_min} < \omega_{th} < \omega_{th_max} \quad (A.3)$$

$$0 < C_{th}(t) < C_{th_max}(\omega_{th}(t)) \quad (A.4)$$

Pour le moteur électrique : $0 < \omega_e(t) < \omega_{e_max}$ (A.5)

$$C_{e_min}(\omega_e(t)) < C_e(t) < C_{e_max}(\omega_e(t)) \quad (A.6)$$

Comme dans le cas du véhicule hybride parallèle simple arbre, le problème d'optimisation peut s'écrire uniquement avec les variables de décisions :

- Le critère considéré est la consommation de carburant sur tout le cycle :

$$J = \sum_{t=0}^{N-1} D(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e \quad (A.7)$$

$$\text{avec } D(C_{th}(t), k(t)) = C\left(C_{th}(t), \frac{\omega_r(t)}{k(t)}\right) \quad (A.8)$$

- La batterie est considérée comme un système dynamique :

$$x(t+1) = x(t) + P_e(C_{th}(t), k(t)) \cdot T_e \quad (A.9)$$

$$\text{Avec } P_{e_th}(C_{th}(t), k(t)) = P_e\left(\frac{C_r(t) - R(k(t)) \cdot \eta_{bv} \cdot C_{th}(t)}{\rho \cdot \eta_{red}}, \frac{\omega_r(t)}{\rho}\right) \quad (A.10)$$

- Contrainte sur l'état de charge

$$x(N) = x(0) + \Delta Soc \quad (A.11)$$

- Contrainte mécanique sur les couples

A partir de la relation (A.1) sur les couples et des contraintes mécaniques (A.4) et (A.6), on obtient :

$$C'_{th_min}(k(t), t) = \max\left\{C_{th_min}(\omega_e(t)), (C_r(t) - \rho \cdot \eta_{red} \cdot C_{e_max}(\omega_e(t))) \cdot \frac{1}{\eta_{bv} \cdot R(k(t))}\right\} \quad (A.12)$$

$$C'_{th_max}(k(t), t) = \min\left\{C_{th_max}(\omega_{th}(t)), (C_r(t) - \rho \cdot \eta_{red} \cdot C_{e_min}(\omega_e(t))) \cdot \frac{1}{\eta_{bv} \cdot R(k(t))}\right\} \quad (A.13)$$

$$C'_{th_min}(k(t),t) \leq C_{th}(t) \leq C'_{th_max}(k(t),t) \quad (A.14)$$

- Contrainte mécanique sur les régimes.

A chaque instant t , le numéro de rapport de boîte de vitesses est restreint par les contraintes (A.3)-(A.6). Soit $K(t)$ l'ensemble des valeurs admissibles pour $k(t)$. Cette contrainte permet d'éviter les sur régimes sur chacun des deux moteurs.

Le problème d'optimisation obtenu est le même que dans le cas du véhicule hybride. Les différents algorithmes proposés dans le chapitre 3 sont donc également utilisables pour les architectures double arbre. A titre d'illustration, les résultats obtenus sur le CEN pour le véhicule B2 sont donnés figure 81.

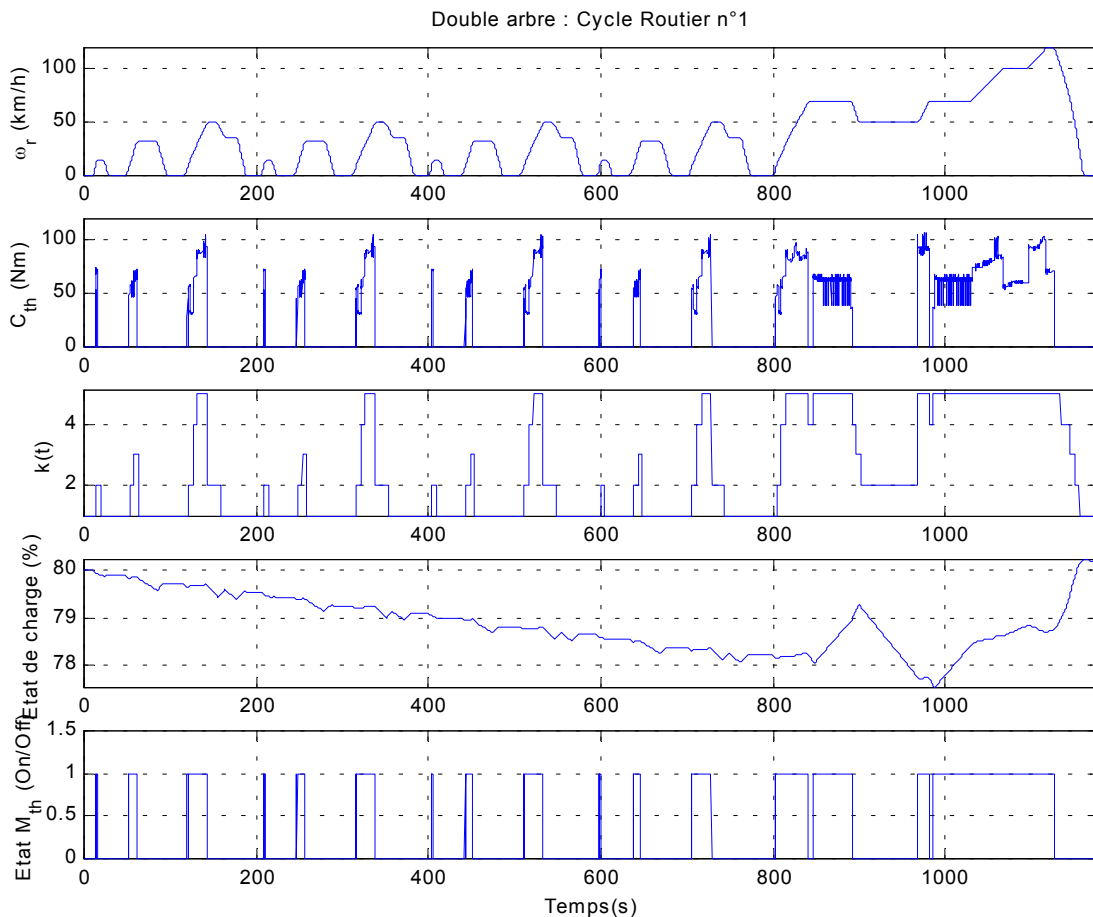


Figure 81 : Résultats sur le CEN pour le véhicule double arbre B2

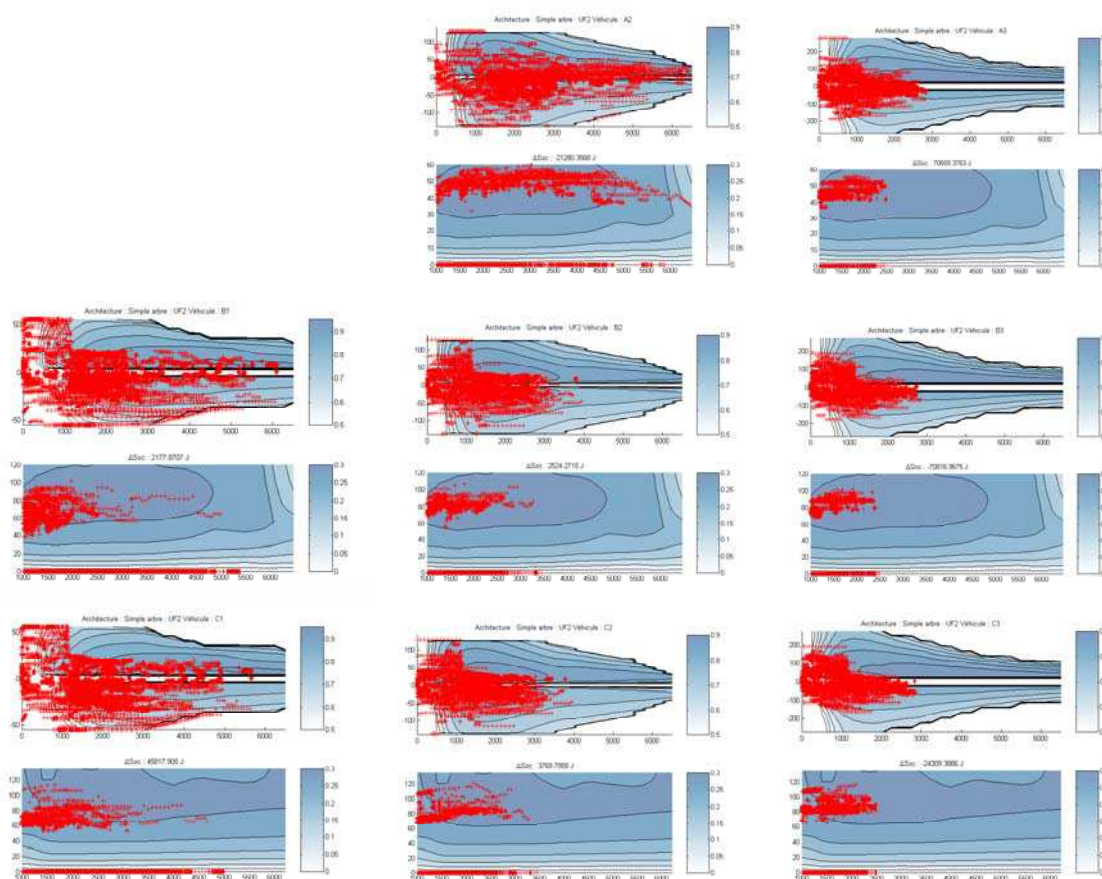
L'algorithme utilisé est celui qui intègre la gestion des états du moteur thermique. La consommation de carburant est de $5,7\text{ l}/100\text{ km}$ pour une variation globale d'état de charge de $0,17\%$.

Annexe B : Résultats obtenus pour différents prototypes parallèle simple et double arbre

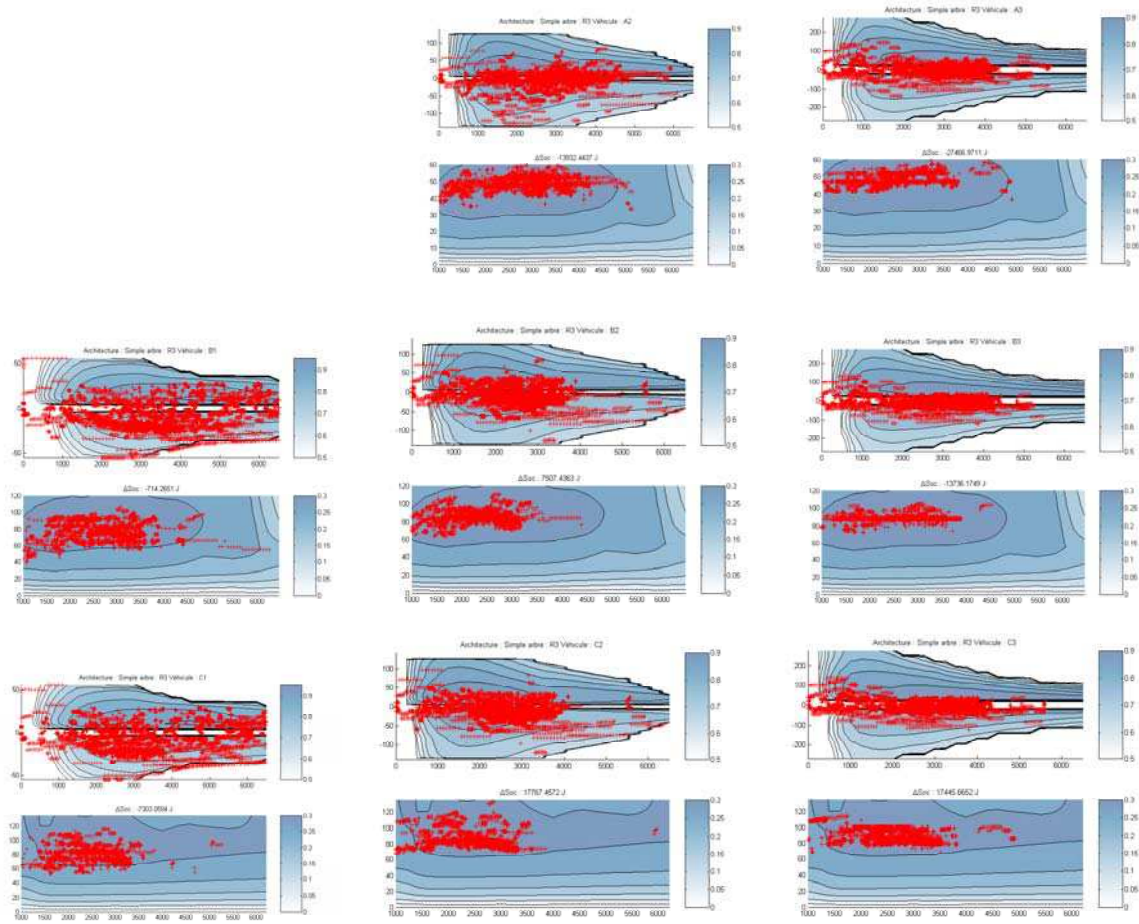
Cette annexe présente les résultats obtenus par les différents prototypes étudiés au cours du troisième chapitre. Trois cycles étudiés : Urbain fluide n°2, Routier n°3 et Autoroute n°1. Ces simulations ont été effectués en l'algorithme d'optimisation globale intégrant la gestion de l'état du moteur thermique. Les résultats sont présentés dans le plan Régime-Couple pour chacun des moteurs.

B.1. Prototypes parallèle Simple arbre

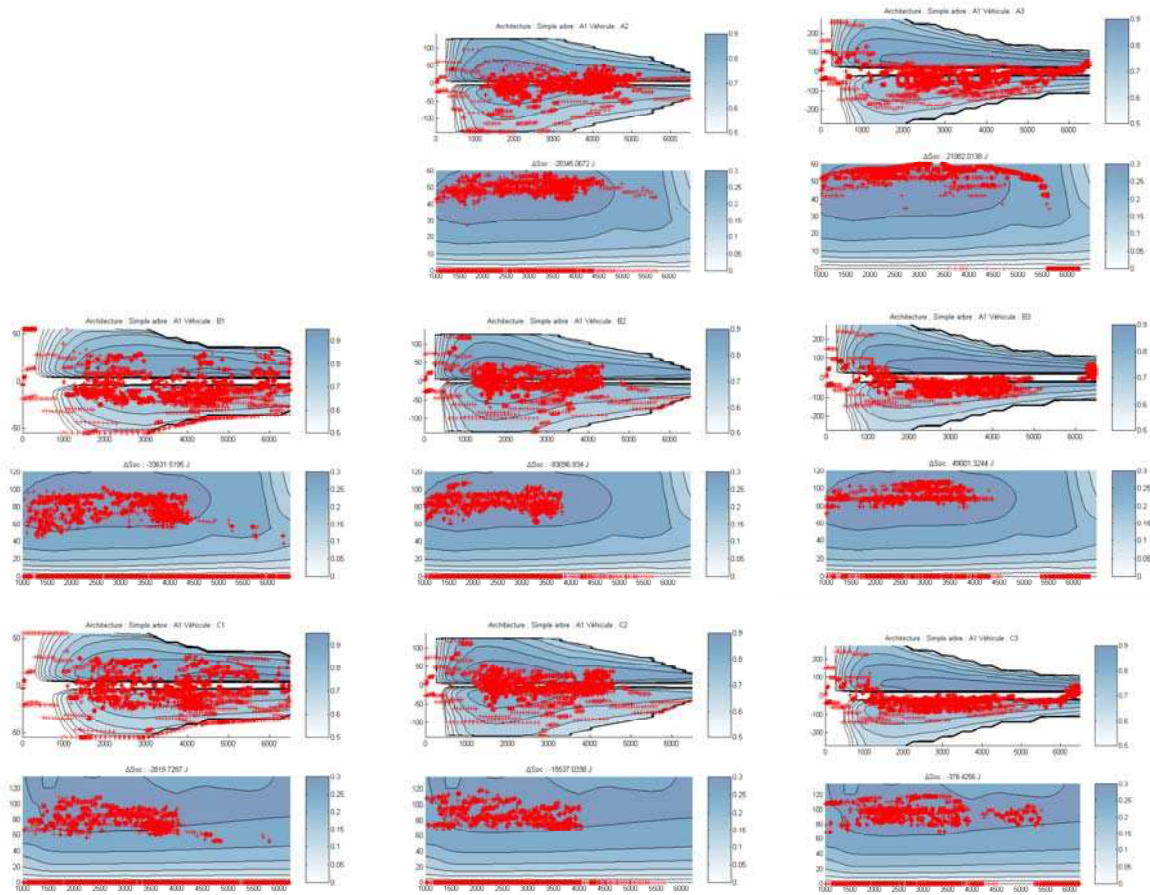
B.1.1. Cycle Urbain Fluide 2



B.1. 2 Cycle Routier n°3

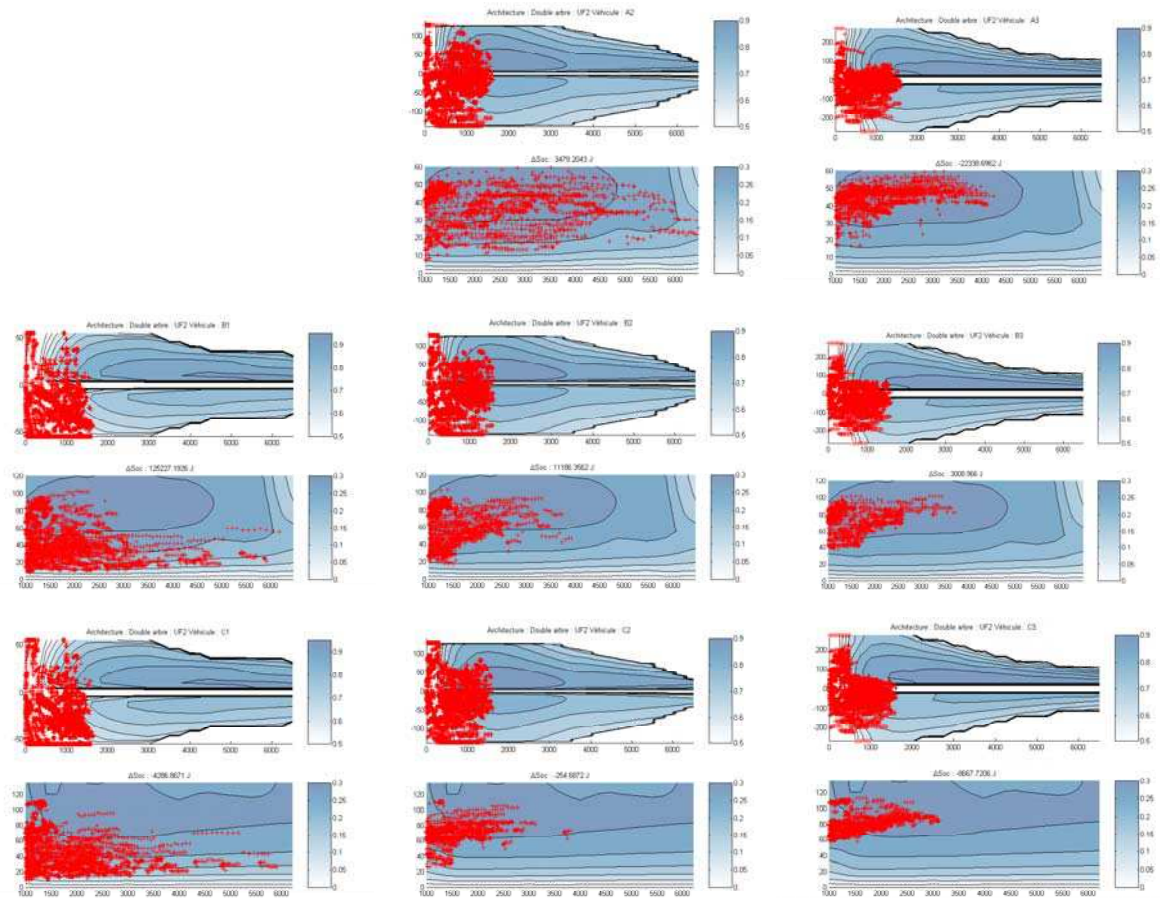


B.1.3 . Cycle Autoroutier n°1

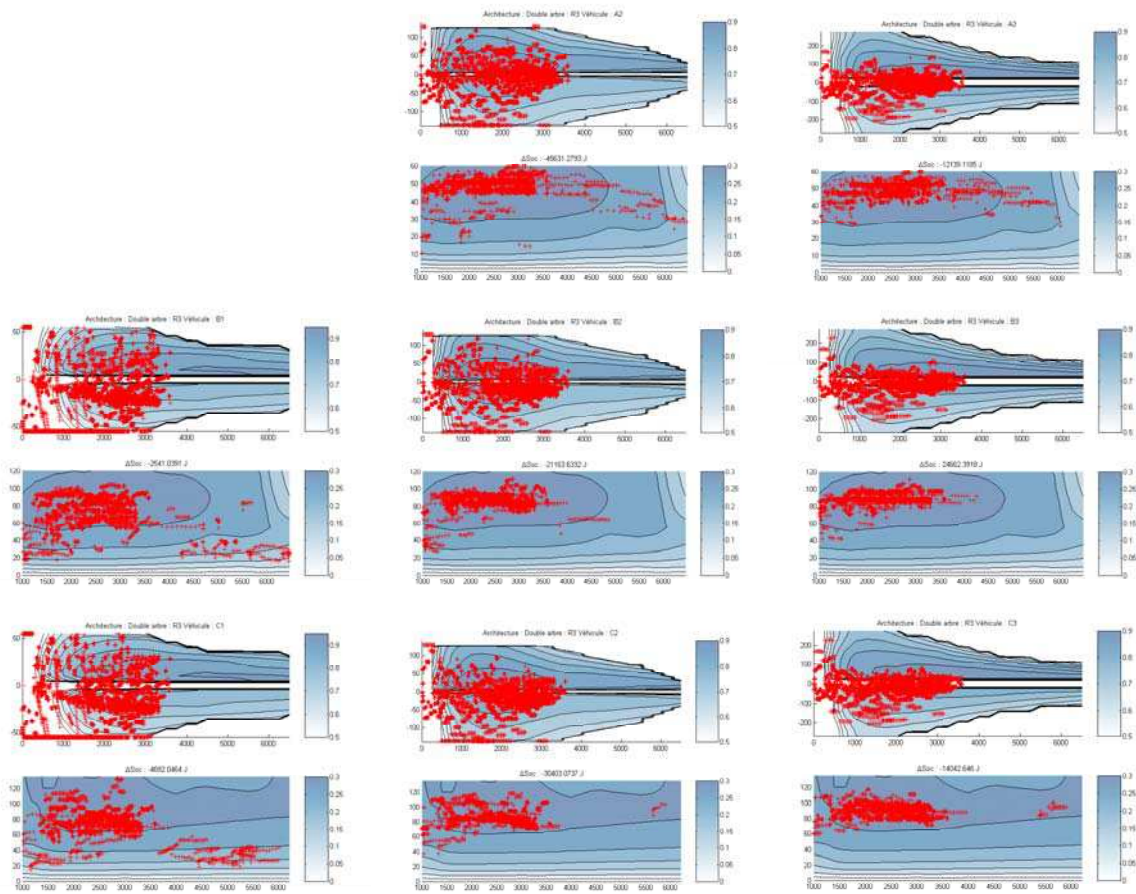


B.2. Architecture double arbre

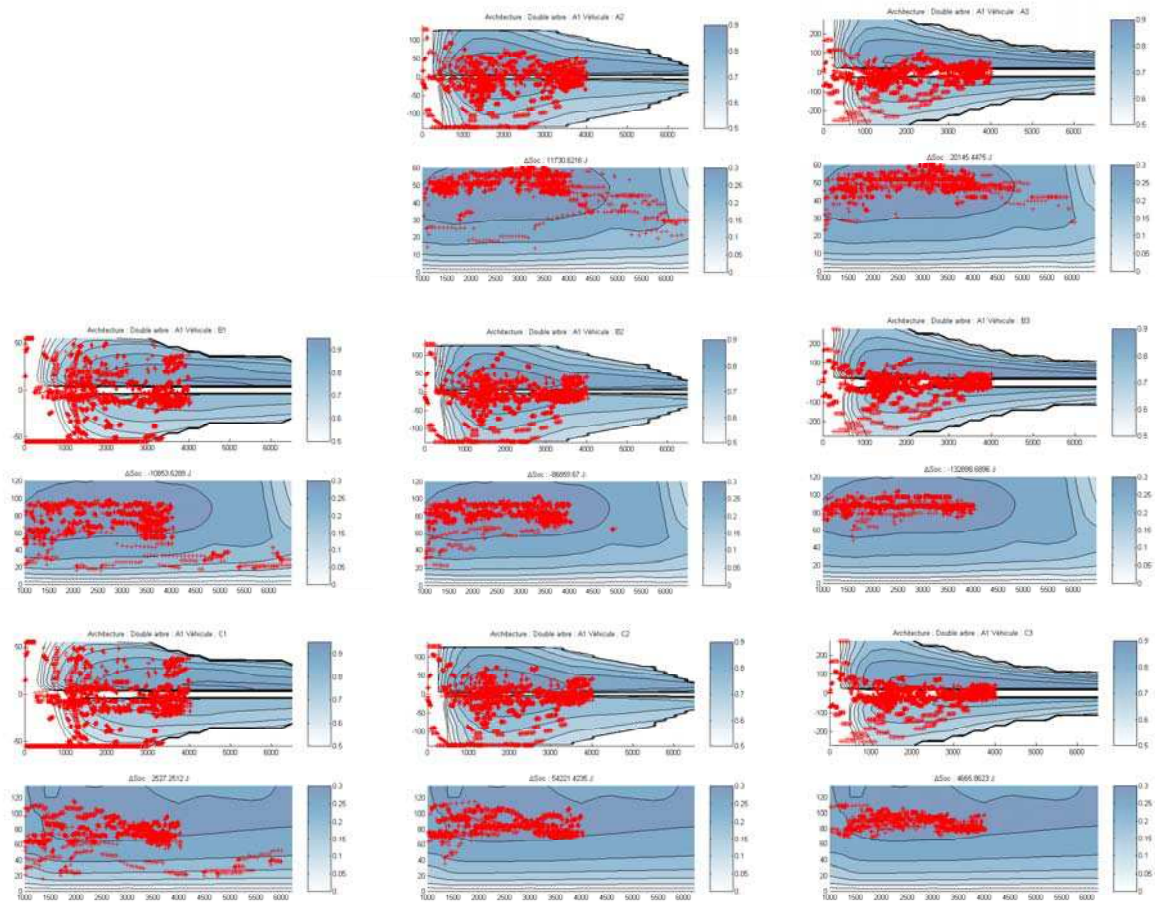
B.2.1. Cycle Urbain Fluide n°2



B.2.2. Cycle Router n°3



B.2.3. Cycle Autoroutier n°1



Liste des figures

Figure 1 : L'architecture hybride série	10
Figure 2: L'architecture hybride parallèle simple arbre	11
Figure 3 : l'architecture double arbre	12
Figure 4: L'architecture hybride combinée	13
Figure 5: Les différents modes de fonctionnement du véhicule hybride	15
Figure 6 : Structure d'un composant	18
Figure 7 : Exemple de composant de la boîte à outils : le moteur électrique	18
Figure 8 : Exemple de modélisation : véhicule conventionnel	19
Figure 9 : Exemple de modélisation : architecture hybride parallèle simple arbre	20
Figure 10 : Architecture du prototype	20
Figure 11:Le groupe motopropulseur assemblé et le véhicule prototype	21
Figure 12 : Principe mécanique et schéma cinétique de la chaîne de traction	22
Figure 13 : Calcul du régime 'optimal' pour le moteur thermique	30
Figure 14 : Pertes et rendements du groupe motopropulseur	32
Figure 15 : Rendement du moteur thermique	33
Figure 16 : Cartographie de changement de rapports	34
Figure 17 : Résultats pour le cycle Routier n°1	35
Figure 18 : Résultats de la stratégie de commande Fuzzy Logic Control Strategy pour le cycle Routier n°1	36
Figure 19 : Points de fonctionnement des deux moteurs par la stratégie de commande pour le cycle CEN	36
Figure 20 : Les pertes dans le groupe motopropulseur	38
Figure 21 : Répartition de la puissance dans le groupe motopropulseur	40
Figure 22 : Pertes totales dans le groupe motopropulseur	41
Figure 23 : Minimisation des pertes sur le cycle Routier n°1	41
Figure 24 : Sensibilité maximale autorisée en fonction de l'état de charge	43
Figure 25 : Résultat de la stratégie LMS avec régulation d'état de charge sur le cycle Routier n°1	44
Figure 26 : Chemin énergétique de la chaîne électrique lors d'une décharge de la batterie.	46
Figure 27 :Echanges énergétiques de la chaîne électrique lors d'une recharge	47
Figure 28 : Résultats de la minimisation de la consommation équivalente sur le cycleR1	47
Figure 29 : Sensibilité limite S_{lim} en fonction de l'erreur d'état de charge	48
Figure 30 : ECMS avec régulation d'état de charge	49
Figure 31 : Algorithme du recuit simulé avec cycles de réchauffement /Bonnemoy & Hamma 1991/	58
Figure 32 : Couple fourni par le moteur électrique vue des roues	59
Figure 33 : Le Cycle Européen Normalisé	61
Figure 34 : Évolution de la consommation en fonction des itérations de l'algorithme du recuit simulé	62

Figure 35 : Solution fournie par le recuit simulé	62
Figure 36 : Consommation de carburant en fonction de la variation d'état de charge	63
Figure 37 : Limite de variations de l'état de charge	65
Figure 38 : Principe de la programmation dynamique	66
Figure 39 : Cartographie de la consommation de carburant	70
Figure 40 : Exemple d'approximation de la consommation de carburant par morceaux de paraboles	71
Figure 41 : Approximation de la dérivée de la consommation par morceaux	72
Figure 42 : Points de fonctionnement pour $\lambda(0) = 0$.	76
Figure 43 : Choix des points de fonctionnement pour $\lambda(0) = -1000$	77
Figure 44 : Points de fonctionnement choisis pour chacun des moteurs pour $\lambda(0) = 1000$	78
Figure 45 : Variation de $x(N) - x(0)$ en fonction de $\lambda(0)$ pour le Cycle Européen Normalisé	79
Figure 46 : Commande optimale appliquée au modèle simplifié sur le CEN	82
Figure 47 : Erreur de suivi de vitesse due au calcul de Cr a priori	82
Figure 48 : Le modèle complet sous Matlab/Simulink	83
Figure 49 : Résultats de l'optimisation globale sur le CEN avec le modèle complet	84
Figure 50 : Suivi de vitesse avec le modèle complet pour le CEN	84
Figure 51 : Comparaison des algorithmes pour le CEN	92
Figure 52 : Résultats obtenus sur le Cycle Européen Normalisé	96
Figure 53 : Rendement du moteur thermique & électrique pour le cycle CEN	97
Figure 54 : Points de fonctionnement dans le plan (C_{th}, C_e) pour le CEN et le cycle Routier n°1	97
Figure 55 : Modèle électrique (très) simplifié d'une batterie au plomb	102
Figure 56 : Exemple de relevé courant-tension	102
Figure 57 : Relevé Courant-Tension de la batterie au plomb	103
Figure 58 : Résultats obtenus avec l'estimation de la résistance à vide	105
Figure 59 : Résultats de l'estimation de l'état de charge	106
Figure 60 : Schéma fonctionnel de la stratégie de commande	107
Figure 61 : Résultats obtenus avec la stratégie λ -control sur le cycle Routier n°1	108
Figure 62 : Couple du moteur thermique pour deux valeurs différentes de variations globales d'état de charge	109
Figure 63 : Etat du moteur thermique et évolution de l'état de charge	109
Figure 64 : Résultats obtenus sur le cycle Routier n°1 avec la stratégie CoupleOpti	112
Figure 65 : Points de fonctionnement des deux moteurs pour le cycle Routier n°1 avec la stratégie Couple Opti	112
Figure 66 : Courbes de consommation minimale et maximale sur le CEN	114
Figure 67 : Comparaison des résultats lors d'une accélération maximale	115
Figure 68 : Cycles utilisés pour l'évaluation des stratégies de commande	117
Figure 69 : Espaces des résultats réalisables par les stratégie temps réel pour chaque cycle	118
Figure 70 : Critères obtenus sur les cycles utilisés pour l'évaluation des stratégies de commande	118

<i>Figure 71 : Résultats pour les différentes stratégies de commande</i>	120
<i>Figure 72 : Critères obtenus par les différentes stratégies en %</i>	121
<i>Figure 73 : Nombre de rapports</i>	124
<i>Figure 74 : Taux d'hybridisation des différents groupes motopropulseurs</i>	124
<i>Figure 75 : Résultats pour les prototypes simple arbre sur le cycle Urbain Fluide n°2</i>	125
<i>Figure 76 : Résultats pour les véhicules simple arbre et le cycle de vitesse Autoroute n°1</i>	126
<i>Figure 77 : Résultats des architectures double arbres sur le cycle Urbain n°2</i>	127
<i>Figure 78 : Résultats des véhicules double arbres pour le cycle Autoroutier n°1</i>	127
<i>Figure 79 : Critères pour les différents prototypes évalués</i>	129
<i>Figure 80: L'architecture hybride parallèle double arbre</i>	143
<i>Figure 81 : Résultats sur le CEN pour le véhicule double arbre B2</i>	145

Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèles

La propulsion des véhicules hybrides est généralement assurée par un ou plusieurs moteurs électriques associés à un moteur thermique. La première partie décrit les grandes familles d'architectures et le prototype réalisé au LAMIH au cours de travaux précédents.

La deuxième partie est consacrée à l'étude d'algorithmes, appelés *stratégies de commande*, qui choisissent à chaque instant la répartition de puissance entre les deux chaînes de traction. Les approches envisagées reposent soit sur l'utilisation du formalisme flou et mettent en œuvre des règles de bon sens soit sur l'analyse plus fine des échanges énergétiques au sein du groupe motopropulseur.

La répartition de puissance entre les différentes motorisations est ensuite écrite sous la forme d'un problème d'optimisation globale sous contraintes. Plusieurs algorithmes basés sur la théorie de la commande optimale sont alors proposés. L'objectif est de rechercher, en simulation, la séquence de commandes qui minimise de la consommation de carburant.

Dans la dernière partie, les résultats des algorithmes d'optimisation globale sont utilisés, dans un premier temps pour proposer deux nouvelles stratégies de commande temps réel. Ensuite, une étude basée sur des critères permettant de caractériser les cycles de vitesses et les performances des stratégies de commande a notamment permis de valider les stratégies proposées. Enfin, l'utilisation des algorithmes d'optimisation globale comme outil d'aide au dimensionnement et aux choix d'architecture est illustré dans la dernière partie.

Mots clés : Véhicule hybride, stratégie de commande, optimisation globale, commande optimale.

Evaluation of control strategies for parallel hybrid vehicles

Hybrid vehicles are usually propelled by one or two electric motor and an internal combustion engine. The first part of this study presents some classical mechanical arrangements and describes the prototype built at the LAMIH during a previous project.

Algorithms, called control strategy, are used to choose at each sampling time the power split between the engine and the motor. Some of them rely on empiric rules and uses fuzzy controllers and other deals with more detailed energy flow analysis.

Then the choice of the power split is written into the form of an optimization under constraint problem. Several algorithms based on the optimal control theory are proposed. The aim is to compute, in simulation, the control sequence that ensures the lowest fuel consumption.

A new control strategy is derived from the global optimization algorithm and a second one is proposed, based on the analysis of the global optimization results. Several criterions are proposed in order to characterize speed cycles, to evaluate control strategies. A comparison of several control strategies shows that one of the proposed control strategies provides best results, closed to those of the global optimization algorithm. At last, the use of the global optimization algorithm for the choice of the mechanical arrangement and sizing the engine and the motor is explained in the last section.

Keywords : Hybrid vehicle, control strategy, global optimization, optimal control.