



HAL
open science

Contribution à l'Amélioration de l'Efficacité Énergétique des Véhicules

Daniela Chrenko

► **To cite this version:**

Daniela Chrenko. Contribution à l'Amélioration de l'Efficacité Énergétique des Véhicules. Ingénierie de l'environnement. université de bourgogne franche comté - école doctorale SPIM, 2017. tel-01695447

HAL Id: tel-01695447

<https://theses.hal.science/tel-01695447>

Submitted on 29 Jan 2018

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

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

SPIM

Rapport pour obtenir
l'Habilitation à Diriger les Recherches



école doctorale sciences pour l'ingénieur et microtechniques

U N I V E R S I T É D E B O U R G O G N E

Contribution à l'amélioration de l'Efficacité Énergétique des Véhicules

■ DANIELA CHRENKO

SPIM

Rapport pour obtenir l'Habilitation à Diriger les Recherches



école doctorale sciences pour l'ingénieur et microtechniques
UNIVERSITÉ DE BOURGOGNE

N° X | X | X

THÈSE présentée par

DANIELA CHRENKO

pour obtenir la

Habilitation à Diriger les Recherches de
l'Université de Bourgogne

Spécialité : **Sciences pour l'Ingénieur**

Contribution à l'amélioration de l'Efficacité Énergétique des Véhicules

Unité de Recherche :
Laboratoire DRIVE EA 1859

Soutenue publiquement le 12 septembre 2017 devant le Jury composé de :

FRANÇOIS BADIN	Rapporteur	Directeur - expert IFP Energies Nouvelles, Lyon, France
THIERRY GUERRA	Rapporteur	Professeur au LAMIH Université de Valenciennes et Hainaut-Cambrésis, France
ROCHDI TRIGUI	Rapporteur	Directeur de recherche, IFSTTAR LTE, Bron, France
PASCAL HIGELIN	Examineur	Professeur Polytech Orléans - PRISME, Orléans, France
DANIEL HISSEL	Examineur	Professeur FEMTO-ST Sharpac, Belfort, France
NARAYAN KAR	Examineur	Professeur University of Windsor, Windsor - Ontario, Canada
LUIS LE MOYNE	Directeur	Professeur uB ISAT - DRIVE, Nevers, France

REMERCIEMENTS

Je m'exprime des remerciements respectueux aux membres du jury de cette HDR :

- François Badin, qui m'a inspiré à travers de son livre ;
- Thierry Guerra, qui apportera le point de vue d'automatisme ;
- Rochdi Trigui, qui est un exemple de travail multidisciplinaire ;
- Pascal Higelin, pour les discussions toujours enrichissantes ;
- Daniel Hissel, qui accompagne mon travail depuis le début ;
- Narayan Kar, qui est un exemple pour des coopérations respectueuses ;
- et Luis Le Moyne pour son soutien et sa confiance.

J'adresse mes remerciements sincères à mes collègues de l'ISAT et du Laboratoire Drive en particulièrement Alan Keromnes, El-Hassane Aglzim et Benoîte Lefort pour les apports sur le travail scientifique, les encouragements et les échanges.

Un grand merci également à mes collègues de l'UTBM et du Femto-ST pour leurs soutiens et particulièrement David Bouquain pour ses multiples conseils.

Ce travail n'aurait pas été possible sans le travail de qualité de mes doctorants Juliette Bert, Zainab Asus, Zul Hilmi Che Daud, Christian Schlasza, Loïc Joud et Shiyu Gan qui sont tous fait une contribution considérable, mais il faut également penser à des autres étudiants Irene Garcia, Raaj Ganesh Samikannu Ramesh, Baptiste Valet et Carlos Damas pour leur contribution.

J'ai également une pensée particulière à l'équipe technique et administrative qui a assuré beaucoup des tâches qui ne sont pas souvent visibles mais toujours importants. Un très grand merci à Karine d'avoir passé autant de temps pour améliorer mon français.

Je suis profondément reconnaissant envers mes collègues du monde entière, notamment Lorena, Reiner, Sheldon, Luiz, Alfredo et Marquidia, autant pour les échanges scientifiques, les belles rencontres et leur amitié.

Merci également à tous les personnes que j'ai rencontré, avec lesquelles j'ai échangé et qui ont aidé d'avoir des nouveaux points de vue. Je me considère chanceuse de pouvoir voir le monde et rencontrer des personnes de différents horizons.

Je tiens également à associer à ces remerciements mes amis et ma famille qui m'ont été d'un soutien constant et particulièrement Guy et Tobias !

SOMMAIRE

1	Introduction	1
1.1	Contexte global	1
1.2	Véhicules Hybrides	2
1.2.1	Types de Véhicules Hybrides	6
1.2.1.1	Degré d'hybridation	6
1.2.1.2	Architectures	7
1.2.2	Rendements et intégration	8
1.3	Positionnement du travail	10
2	Besoins réels des véhicules	17
2.1	Les cycles de conduite connus	17
2.1.1	Cycles Européens	17
2.1.2	Cycles Internationaux	18
2.1.3	Cycles Améliorés	18
2.1.4	Cycles vs Besoins réels	19
2.2	Besoin d'analyser/simuler les cycles de conduite réelle	23
2.3	Vitesse en fonction du temps	29
2.3.1	Construction d'un cycle de conduite à partir de tronçons [1]	29
2.3.2	Extraction des données des tronçons en utilisant des logiciels de planification routière	30
2.3.3	Comparaison d'un cycle de conduite mesuré avec un cycle de conduite construit	31
2.3.4	Utilisation du générateur de cycles de conduite	31
2.4	Analyse de l'utilisation réelle	35
3	Gestion d'énergie	37
3.1	Gestion d'énergie dans les véhicules hybrides	37
3.2	Contrôle Déterministe	40
3.3	Stratégies de commande basées sur l'optimisation	40
3.3.1	Optimisation Transitoire	41

3.3.1.1	Stratégie de Minimisation de la Consommation Équivalente (ECMS)	41
3.3.1.2	Commande Prédictive basée sur la Modélisation	41
3.3.1.3	Autres approches d'optimisation transitoire	42
3.3.2	Optimisation Globale	43
3.3.2.1	Optimisation Globale avec Algorithme Génétique	43
3.3.2.2	Programmation Dynamique Déterministe	44
3.3.2.3	Programmation Dynamique Stochastique	45
3.4	Classification des approches de gestion d'énergie	46
4	Modélisation des Systèmes Multi-Physiques	49
4.1	Modèle Quasi Statique et Application du Contrôle Déterministe	49
4.1.1	Voiture NOAO	49
4.1.2	Stratégie de contrôle actuelle	50
4.1.3	Modèle quasi-statique	51
4.2	Développement de la structure de commande	53
4.2.1	Modèle dynamique	53
4.2.2	Représentation énergétique macroscopique (REM)	53
4.2.3	Commande sur la base d'inversion [2]	55
4.2.4	Validation de l'approche	58
4.3	Programmation Dynamique de la Noao	64
4.3.1	DP formulation du problème	64
4.3.2	Amélioration du système actuel	65
4.3.2.1	Application DP sur véhicule en état	65
4.3.2.2	Amélioration de l'autonomie	65
4.3.2.3	Amélioration de la performance	66
4.4	Présentation des résultats	66
4.5	Évolution de gestion par optimisation	68
4.6	Modélisation Multi-Architecture/Multi-Application	73
5	Composants	75
5.1	Moteur thermique	75
5.1.1	Approche de modélisation d'un moteur thermique simplifiée [3]	76
5.1.1.1	Approche Simple	76
5.1.1.2	Approche Améliorée	79
5.1.1.3	Vérification de la méthodologie	80

5.1.2	Influence des paramètres météorologiques	83
5.1.2.1	Contexte de travail	83
5.1.2.2	Résultats et discussions	83
5.1.2.3	Amélioration de la description des conditions météorologiques	88
5.2	Modèle simple d'une machine synchrone à aimants permanents	90
5.3	Batterie Lithium-ion	94
5.3.1	Batteries utilisées pour le transport	94
5.3.2	Contexte des études des batteries Lithium-ion pour Véhicules Électriques et Hybrides	96
5.3.3	Étude du Comportement Thermique de la Batterie Lithium-ion pour Véhicules Électriques et Hybrides	97
5.3.3.1	Étude expérimentale	97
5.3.3.2	Modélisation électro-thermique	102
5.3.3.3	Conclusions et perspectives de modélisation électro- thermique	103
5.3.4	Vieillessement des batteries Lithium-ion	106
5.3.4.1	Vieillessement, durée de vie et définition du SOH	106
5.3.4.2	Mécanismes de vieillessement	107
5.3.4.3	Classification des mécanismes de vieillessement avec FMEA110	
5.4	Pile à combustible	113
6	Valorisation des Rejets Thermiques	117
6.1	Modèle numérique du moteur Stirling	117
6.2	Validation Expérimentale	119
6.2.1	Influence de la vitesse de rotation	120
6.2.2	Influence de la température côté chaud	120
6.2.3	Influence de la pression de remplissage	120
6.3	Optimisation du Moteur Stirling	126
6.3.1	Optimisation de la cinématique	126
6.3.2	Applicabilité de l'approche d'optimisation du moteur Stirling	127
7	Expérience dans l'animation de recherche	131
7.1	Thèses de doctorat, masters et projets de fin d'études	131
7.1.1	Thèses de doctorat	131
7.1.1.1	Contribution à l'étude de la valorisation des rejets ther- miques - Étude et optimisation de moteurs Stirling	131

7.1.1.2	Effective Simulation Model and New Control Strategy to Improve Energy Efficiency in Hybrid and Electric Land Vehicle	131
7.1.1.3	Contribution à l'Étude du Comportement Thermique de la Batterie Lithium-ion pour Véhicules Electriques et Hybrides	132
7.1.1.4	Stratégie intelligente de gestion du système énergétique global d'un véhicule hybride	132
7.1.1.5	Développement d'un outil de gestion de véhicule hybride multi architecture/multi application	132
7.1.2	Mémoires de Master	133
7.1.2.1	Développement d'un générateur de cycles de conduite . .	133
7.1.2.2	Dimensionnement des composants des véhicules hybrides sur leur durée de vie	133
7.1.2.3	Modélisation multi-physique d'une pile à combustible PEM	133
7.1.3	Projets de recherche	133
7.1.3.1	Étude de l'influence des paramètres environnementaux sur les besoins d'énergie des véhicules conventionnels et hybrides	133
7.1.3.2	Description des conditions environnementales à différents endroits et description du comportement d'une machine synchrone à aimants permanents	133
7.2	Coopérations industrielles	134
7.3	Coopérations universitaires	134
7.3.1	Thèses de doctorat en coopération avec d'autres universités	135
7.3.1.1	Analysis of aging mechanisms in Li-ion cells used for traction batteries of electric vehicles and development of appropriate diagnostic concepts for the quick evaluation of the battery	135
7.3.1.2	The role of Knowledge Management in Systems Engineering for Automated Driving Functions	135
7.3.2	Projet Région Franche-Comté 2013 (UTBM)	135
7.4	Reconnaisances scientifiques	135
7.5	Publications	136
8	Conclusion et perspectives	141
I	Annexes	165
A	Curriculum Vitae Détaillé	167

A.1 Renseignements généraux	167
A.2 Situation actuelle	167
A.3 Enseignement	168
A.4 Recherche	169
A.4.1 Encadrement	172
A.5 Réponses aux appels à projets et projets collaboratifs	174
A.6 Autres activités	174
A.7 Thèse de Doctorat	175
A.8 Connaissances Antérieures	177
A.8.1 Formations	177
A.8.2 Expériences Professionnelles	178
A.8.3 Compétences Techniques	178
A.8.4 Interculturalité	179
A.9 Intérêts	179
A.10 Tableau des Enseignements	179

INTRODUCTION

1.1/ CONTEXTE GLOBAL

Notre mode de vie individualiste et développé est basé sur l'utilisation intensive d'énergie. Une grande partie de cette énergie est issue de ressources non renouvelables comme le pétrole, le gaz naturel, le charbon ou encore les ressources nucléaires. Même si l'utilisation des ressources fossiles a toujours existé, elle a grandement augmenté depuis le début du vingtième siècle. L'énergie est utilisée pour améliorer le confort individuel, par exemple, pour la production des biens et de la nourriture, la climatisation de l'habitat ou le transport. Différents vecteurs sont utilisés pour l'acheminement de l'énergie, notamment l'énergie électrique et les carburants liquides, mais également les gaz (Figure 1.1).[4].

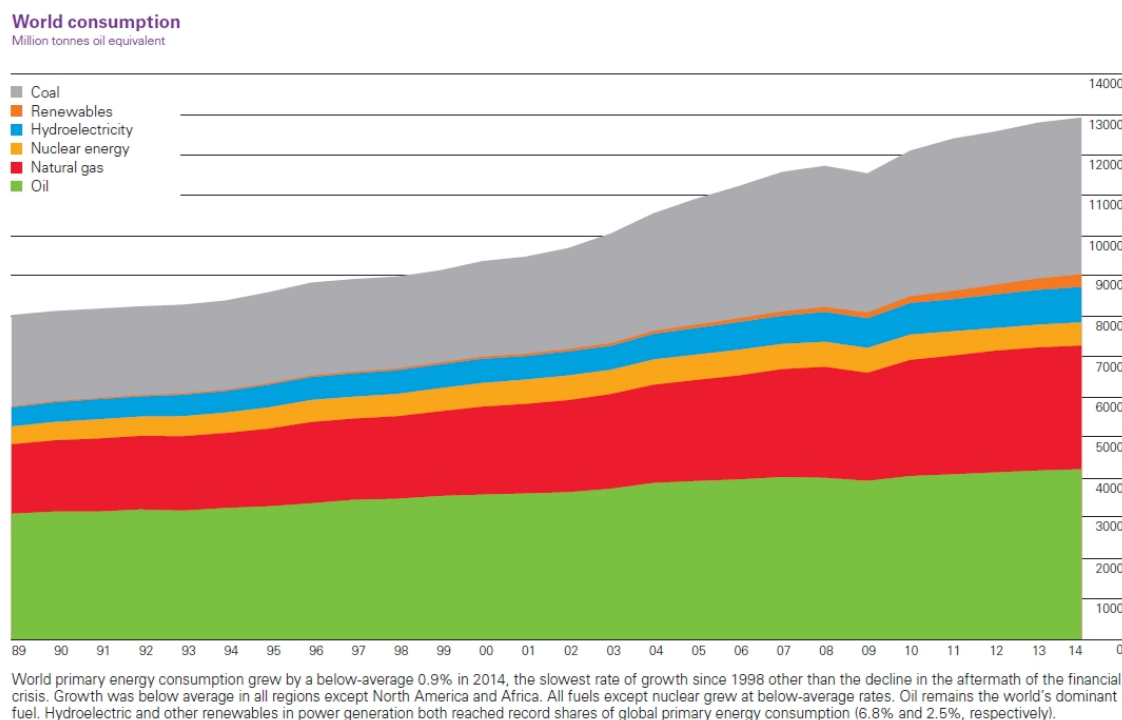


FIGURE 1.1 – Consommation d'énergie, selon vecteur d'énergie [4]

Cette utilisation intensive des ressources fossiles implique une émission de grandes quantités de gaz issus des réactions chimiques comme le dioxyde de carbone. Les quan-

tités des gaz (Figure 1.2) sont telles qu'elles changent la composition de l'atmosphère terrestre, notamment pour le dioxyde de carbone (CO_2) qui est passé de 338,80 ppm en 1980 à 399,45 ppm en 2015 (Figure 1.3) [5]. Ceci mène à un dérèglement de l'équilibre thermique de la terre qui résulte d'une augmentation de la température moyenne, appelée **réchauffement climatique** (Figure 1.4) [6]. Ce réchauffement transforme profondément l'environnement (flore et faune) et peut menacer notre mode de vie [7].

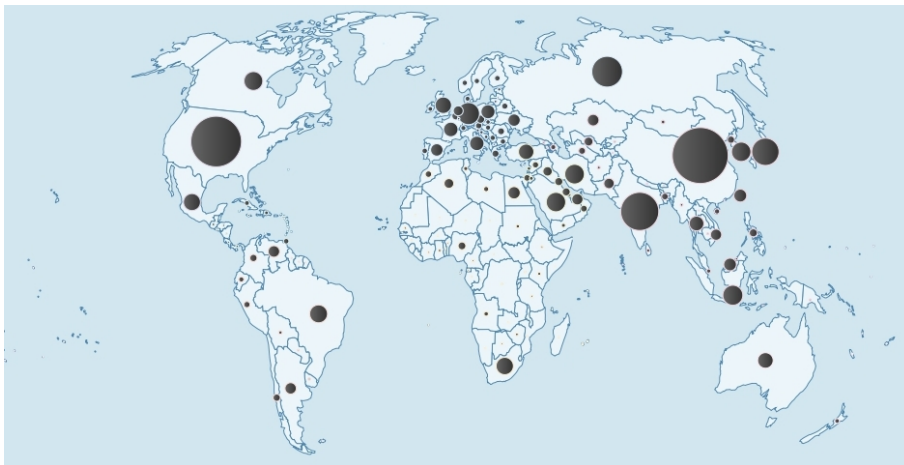


FIGURE 1.2 – Émissions de CO_2 en 2014 en Mtons (World Carbon Project [8])

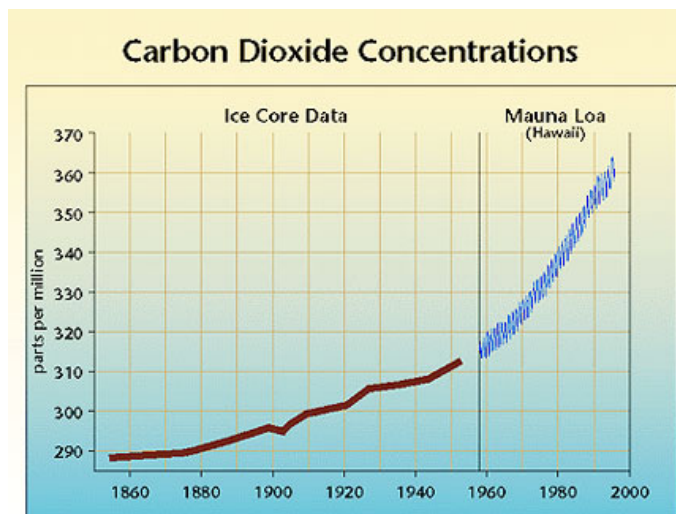
Une partie considérable des émissions de gaz à effet de serre est issue des transports terrestres, basés sur des véhicules utilisant des carburants d'origine fossiles (Figure 1.5) [9]. Le transport terrestre peut être divisé en transport des biens et en transport des personnes. Il y a différents modes de transport des personnes, mais la voiture individuelle garde un rôle prépondérant (Figure 1.5, Figure 1.6).

Pour limiter l'influence des voitures, des régulations diverses imposent une rupture technologique. En Europe, les régulations visent une limitation des émissions et sont regroupées dans la réglementation EURO, les réglementations aux Etats-Unis visent premièrement la limitation de la consommation de carburant et sont regroupées en CAFE (Corporate Average Fuel Efficiency) [11]. Grâce à elles, de nombreuses avancées ont vu le jour.

1.2/ VÉHICULES HYBRIDES

Des progrès sont encore envisageables pour les moteurs à combustion dus à une amélioration technologique [12] ou une utilisation de différents carburants [13]. Une autre piste est l'amélioration du rendement global en utilisant différentes sources ou convertisseurs d'énergie, dans des véhicules hybrides (HV) [14]. Les véhicules hybrides permettent entre autre, de récupérer de l'énergie lors des freinages ou - dans le cas des véhicules hybrides rechargeables - de remplacer une partie de l'énergie nécessaire pour la propulsion par de l'énergie électrique. Ceci se fait en rechargeant les batteries d'un véhicule hybride par le réseau d'électricité. Cette électricité peut, selon son mode de production, afficher des émissions de gaz à effet de serre différentes.

Les véhicules hybrides utilisent deux ou plusieurs sources, stockages ou convertisseurs

FIGURE 1.3 – Évolution de la concentration de CO₂ [8]

d'énergie pour la propulsion. Si une des sources livre son énergie sous forme d'énergie électrique le système s'appelle : véhicule hybride électrique (HEV).

Data source: NASA's Goddard Institute for Space Studies (GISS). Credit: NASA/GISS

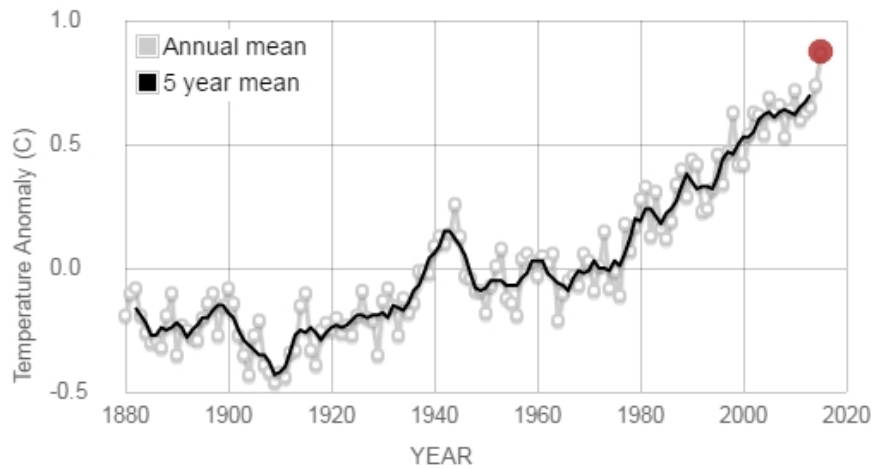
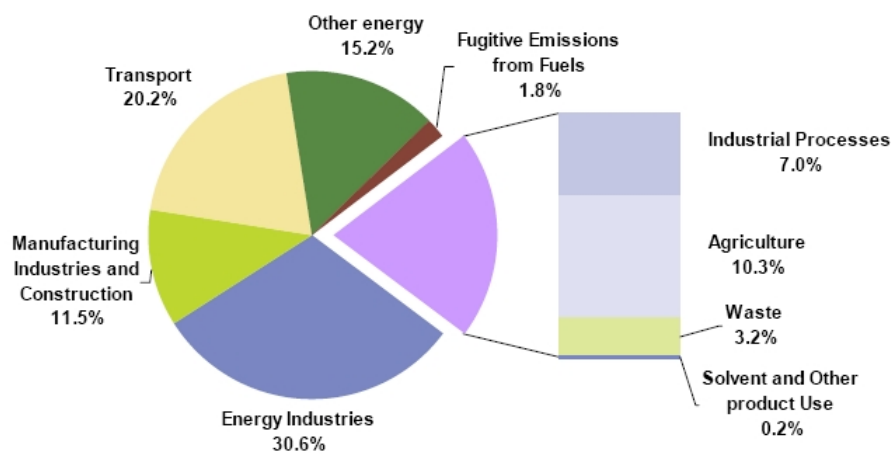
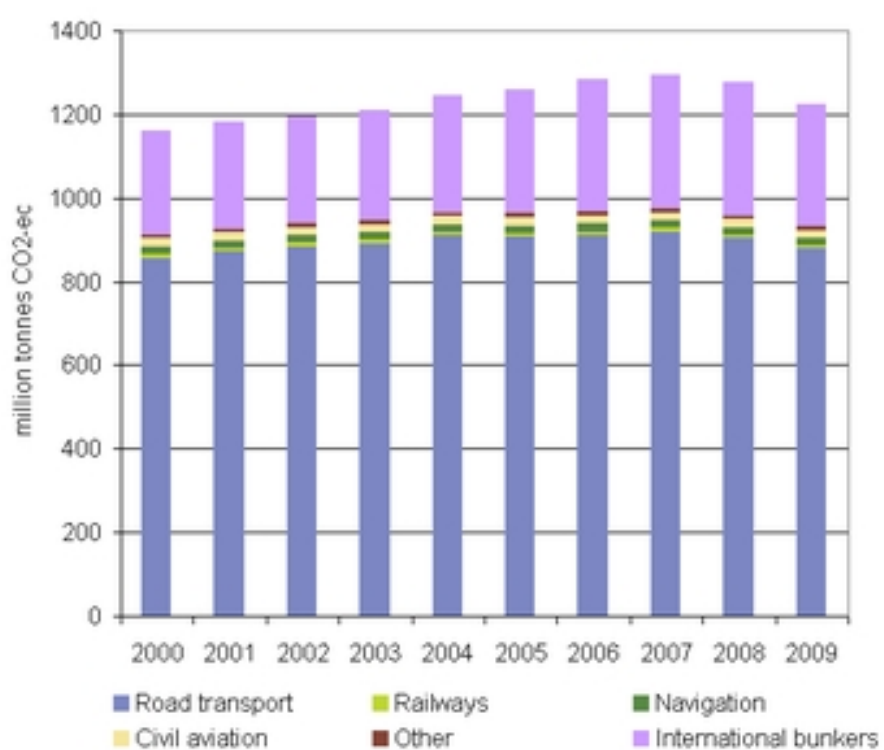


FIGURE 1.4 – Évolution de la température [6]



Source: EEA, also available at Eurostat (online data code: tsdcc210)

FIGURE 1.5 – Émissions de gaz à effet de serre par secteur en Europe [9]



Source: EEA Greenhouse Gas Data Viewer

FIGURE 1.6 – Emissions de gaz à effet de serre par secteur [10]

1.2.1/ TYPES DE VÉHICULES HYBRIDES

Souvent un véhicule hybride est assimilé à une architecture avec un moteur thermique à combustion interne en combinaison avec un moteur électrique et un stockage d'énergie électrique dans des batteries. Cependant, tout autre combinaison des sources, stockages ou convertisseurs est également possible. Il peut donc être intéressant d'envisager une hybridation thermique/pneumatique comme présentée par PSA [15] ou une hybridation chimique/électrique comme par exemple dans des véhicules à pile à combustible avec batterie ou super condensateur [16].

Un grand avantage des véhicules hybrides est la possibilité de récupérer de l'énergie. Pour ce faire, il y a plusieurs manières comme la récupération de l'énergie au freinage, ou encore l'utilisation des véhicules hybrides de type plug-in (PHEV). Dans cette dernière configuration une partie de l'énergie nécessaire pour la propulsion peut être remplacée par de l'énergie électrique en rechargeant les batteries. Grâce à cette énergie électrique, qui - selon son mode de fabrication - peut être liée à des émissions de gaz à effet de serre moindres, les émissions du PHEV peuvent être limitées ainsi que sa consommation de carburant.

En général, les véhicules hybrides sont classés selon leur degré d'hybridation ou leur architecture.

1.2.1.1/ DEGRÉ D'HYBRIDATION

Le degré d'hybridation est en général utilisé pour décrire le rapport entre les composants d'un véhicule hybride avec un moteur à combustion interne et un moteur électrique. Il n'existe pas une valeur distincte pour décrire le degré d'hybridation, mais il peut être défini à travers différents indicateurs, notamment la puissance thermique et électrique, l'énergie électrique stockée, la tension du réseau électrique ou encore l'autonomie électrique.

En général, on distingue un premier groupe appelé **mild hybrides** qui caractérise des véhicules thermiques avec une petite aide électrique qui permet de couper le moteur thermique à l'arrêt, de récupérer de l'énergie au freinage et de fournir une aide à l'accélération, mais il n'est pas possible de faire rouler le véhicule uniquement grâce à l'énergie électrique. Un mild hybride peut entraîner une diminution de consommation jusqu'à 5% environ. Une grande partie des véhicules hybrides sur le marché actuellement sont des mild hybrides.

Le deuxième groupe est appelé **full hybrides**, avec un système électrique plus puissant. Cette puissance permet de couper le moteur thermique à l'arrêt et de récupérer de l'énergie au freinage, elle rend l'optimisation du point de fonctionnement des moteurs à combustion interne possible et donne la possibilité de rouler uniquement grâce à l'énergie électrique sur une distance d'environ 2 km. Un full hybride peut entraîner une diminution de consommation d'ordre de grandeur 10%.

Si la batterie peut être rechargée par le secteur et permet une autonomie électrique d'environ 20 km ou plus on parle d'un **hybride plug-in**. Comme un nombre considérable de déplacements est en dessous de 20 km [17], et que la consommation d'énergie électrique n'est pas prise en compte dans le calcul de la consommation du carburant, les véhicules hybride plug-in peuvent entraîner une diminution de consommation jusqu'à 20%.

Une vue d'ensemble est donnée en Figure 1.7.

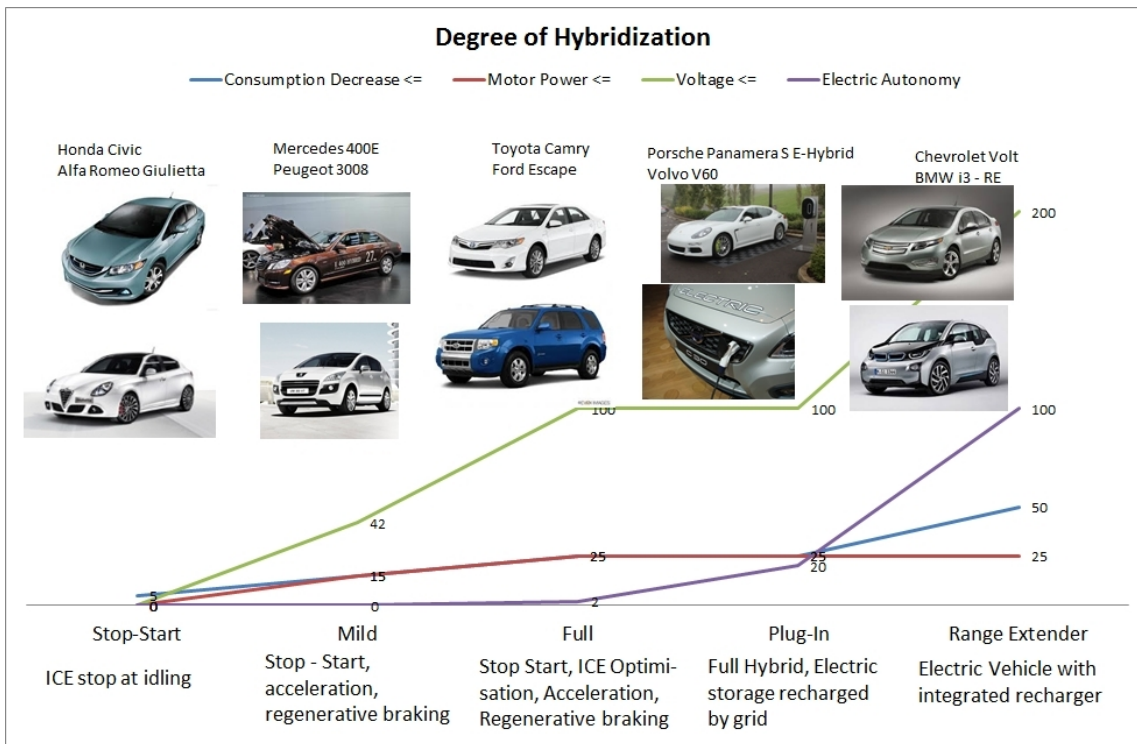


FIGURE 1.7 – Vue globale des degrés d'hybridation

1.2.1.2/ ARCHITECTURES

Un autre critère de distinction est l'architecture de l'hybridation. En général, on en distingue quatre.

Hybride Série

Un hybride série est propulsé uniquement grâce à un moteur électrique géré par un convertisseur qui transforme l'énergie électrique. Cette énergie peut provenir de différentes sources : en général, une batterie et/ou un super-condensateur et très souvent un générateur qui transforme l'énergie mécanique d'un moteur à combustion interne en énergie électrique (Figure 1.8 a)). L'architecture hybride série est particulièrement adaptée pour des systèmes ayant une grande batterie. Une application de véhicule hybride série est le véhicule de compétition NOAO conçu et fabriqué par le Pôle de Performance de Nevers Magny-Cours (PPNMC) et utilisé comme base de travail pour la thèse de Zainab Asus [2, 18, 19, 20] (sections 4.1.1 et 7.1.1.2). Une particularité de cette architecture est que le moteur thermique soit complètement dissocié de la transmission. En conséquence, il est possible d'utiliser le moteur à combustion interne à tout point de fonctionnement et à tout moment.

Hybride Parallèle

Dans un hybride parallèle deux sources d'énergie sont liées aux roues directement à travers un système de transmission adapté. Le moteur électrique et le moteur à combustion interne peuvent fournir leur énergie directement à la roue (Figure 1.8 b)). Cette architecture demande un système de transmission sophistiqué, mais elle ne nécessite pas de générateur ce qui peut être un avantage en termes de poids. Une gestion adaptée permet aux moteurs de fonctionner dans de multiples modes comme, l'aide à l'accélération

grâce au moteur électrique ou la récupération d'énergie électrique lors des freinages. L'architecture hybride parallèle est particulièrement adaptée pour des mild hybrides où le moteur à combustion interne garde son rôle dominant pour la propulsion. Étant donné que le moteur thermique est directement lié aux roues à travers la transmission, la vitesse de rotation est donc imposée et son point de fonctionnement peut uniquement être adapté par rapport au couple.

Hybride série/parallèle ou power split

Une combinaison des deux architectures de base peut être rencontrée dans des hybrides série/parallèle qui portent également le nom de hybride à dérivation de puissance (power split hybrid). Un système sophistiqué de transmission, parfois sous forme de train épicycloïdal, permet le fonctionnement du système en tant que hybride série, hybride parallèle ou les deux à la fois (Figure 1.8 c)). Cette architecture demande l'utilisation de deux moteurs/générateurs électriques. Une gestion optimisée permet d'adapter à la fois la vitesse de rotation du moteur à combustion interne et le couple pour atteindre les points de fonctionnement les plus avantageux. Même si cette architecture est plus complexe, elle trouve son application dans les Toyota Prius, les véhicules hybrides les plus vendus pour l'instant [14].

Autres architectures

A part, ces trois architectures classiques, il est possible de prévoir toute autre combinaison entre différentes sources d'énergie de façon directe ou indirecte. Ces architectures sont regroupées sous le nom hybrides complexes (Figure 1.8 d)).

Parmi le grand nombre d'architectures possibles, il y a des systèmes qui n'interviennent pas au niveau de la transmission, mais au niveau du moteur à combustion interne comme le système e-Turbo utilisé dans la compétition automobile [21].

Pour l'instant, aucune des architectures ne montre un réel avantage par rapport aux autres. Toutes les architectures co-existent dans des véhicules hybrides disponibles sur le marché automobile.

1.2.2/ RENDEMENTS ET INTÉGRATION

Les inconvénients dus au poids élevé et au système plus complexe des véhicules hybrides doivent être compensés par un rendement énergétique supérieur au rendement qui peut être obtenu en utilisant un véhicule à combustion interne pour les rendre intéressants du point de vue de leur consommation. Cet objectif n'est pas si simple à atteindre car les véhicules à combustion interne continuent à améliorer leurs performances [12]. Cela étant, une architecture hybride permet d'utiliser tous les composants de manière optimale. Ceci est particulièrement intéressant pour le moteur à combustion interne dont les rendements varient fortement avec son point de fonctionnement. De plus, des composants électriques comme les batteries, super-condensateurs et moteurs électriques ont des rendements plus avantageux que des moteurs à combustion interne.

Un autre aspect avantageux pour les véhicules hybrides est qu'ils permettent de récupérer de l'énergie lors des freinages. Cette énergie, qui peut représenter jusqu'à 20% de l'énergie totale [14], donne un potentiel considérable.

Cependant, pour réaliser ce gain de rendement, une gestion d'énergie bien adaptée est nécessaire entre les différents composants.

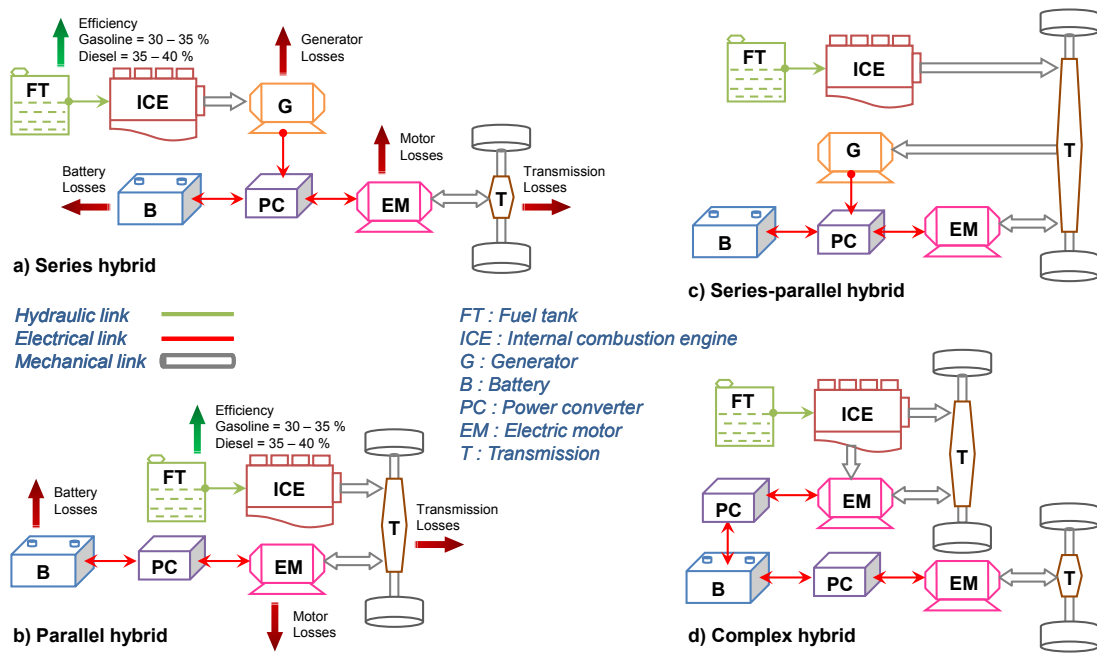


FIGURE 1.8 – Architectures hybrides [22]

1.3/ POSITIONNEMENT DU TRAVAIL

Dans des véhicules hybrides utilisant différentes chaînes de propulsion, il ne faut plus considérer les composants dans les chaînes comme des éléments distincts mais comme des sources potentielles d'énergie au sein d'un même groupe moto-propulseur. L'enjeu sera donc de travailler sur l'optimisation énergétique du système dans son ensemble.

Pour bien cibler l'optimisation énergétique du système, il est important de bien comprendre les besoins réels des véhicules. Jusqu'à maintenant, une grande partie de l'optimisation est basée sur un nombre limité de cycles artificiels qui ne sont souvent pas représentatifs. Des approches plus réalistes sont nécessaires tout en prenant en compte l'influence du comportement du conducteur et des conditions environnementales, (chapitre 2).

La gestion d'énergie peut être faite de différentes façons. Jusqu'à maintenant, des approches déterministes sont très souvent utilisées, mais il serait intéressant de les remplacer par des solutions d'optimisation. Il faut néanmoins prendre en compte, qu'une bonne optimisation s'étale sur un cycle de conduite complet. Pour cela il sera préférable de connaître à l'avance le cycle et d'adapter la gestion à des changements de condition qui peuvent arriver durant le cycle (conditions du trafic ou conditions météorologiques). Il est en outre nécessaire d'évaluer la qualité d'une commande et de chiffrer l'impact des adaptations. Pour cela, on utilise des techniques d'optimisation globale qui nécessitent la connaissance du cycle complet et peuvent donc uniquement être appliquées hors ligne après le cycle.

Les avancées des capteurs et des systèmes électroniques associés donnent accès à un ensemble de données lors de l'utilisation du véhicule (eg. géolocalisation, trajet, état du trafic) et du groupe moto-propulseur (état de charge de la batterie, fonctionnement du moteur à combustion interne, ...). La généralisation des supports d'enregistrement permet également de conserver l'historique de l'utilisation du véhicule, y compris les informations sur le pilotage. Cependant, ces paramètres ne sont pas suffisamment exploités. Ils peuvent être néanmoins très valorisants pour une optimisation énergétique du groupe moto-propulseur, (chapitre 3).

Aujourd'hui une grande partie des développements des systèmes est basée sur des approches de modélisations. Des modèles nécessaires pour une optimisation énergétique doivent être assez précis pour décrire la sensibilité des systèmes par rapport à différents paramètres. Comme une optimisation énergétique englobe la totalité des systèmes, une modélisation multi-physique est nécessaire. De plus, l'optimisation énergétique inclut une gestion d'énergie et nécessite une adaptation du système de commande. Pour toutes ces raisons, une modélisation quasi-statique a permis d'acquérir des compétences nécessaires, pour créer en suite des modèles utilisant la REM (représentation énergétique macroscopique). Une approche intéressante d'évolution de la REM est développée.

La modélisation est effectuée sur l'exemple du véhicule Noao, un véhicule hybride série de compétition développé par le PPNMC, qui est utilisé comme base pour différentes thèses de doctorat. Des principes de modélisation et des résultats sont présentés en chapitre 4.

Pour la bonne gestion d'un véhicule, il est important de ne pas uniquement tenir compte de l'aspect énergétique, mais également des aspects d'intégration thermique et de la durée de vie des composants. Même si les performances des moteurs à combustion in-

terne varie avec les conditions environnementales et au cours de leur vie, ces variations ne sont pas très importantes et ne nécessitent pas de modification de la gestion. Pour des composants électriques comme les convertisseurs de puissances ou les batteries à base de Lithium-ion la température a une très grande influence sur la performance et doit être considéré comme un paramètre de commande. De plus, une dégradation de performance de la batterie Lithium-ion, pouvant survenir durant la vie du véhicule, doit être prise en compte dans la gestion.

Il est également intéressant d'étudier les piles à combustible qui peuvent un jour remplacer les moteurs à combustion interne dans les véhicules hybrides en utilisant de l'hydrogène comme combustible, car l'hydrogène peut être généré à partir de sources renouvelables. Dans le domaine des piles à combustible, des approches de diagnostic des composants sont déjà bien avancées, ces techniques doivent aussi être appliquées sur les batteries Lithium-ion pour adapter leur utilisation à leur état de santé, (chapitre 5).

Finalement, il est judicieux de penser à la récupération d'énergie thermique qui est jusqu'à maintenant perdue. Cette énergie peut être utilisée pour la propulsion ou pour les auxiliaires. Les moteurs Stirling peuvent être une solution pour valoriser cette énergie thermique, autrement perdue, comme source d'énergie électrique, (chapitre 6).

Le projet scientifique présenté dans le contexte de ce Rapport pour obtenir l'Habilitation à Diriger les Recherches s'approche de cette thématique complexe et multi-physique à travers un travail de recherche mené au sein du laboratoire DRIVE EA1859. Un tel travail ne peut s'effectuer qu'avec des coopérations avec d'autres chercheurs et à travers : le co-encadrement de trois thèses de doctorat déjà abouties, le co-encadrements de deux thèses en cours, l'encadrement de trois mémoires de master, le co-encadrement de deux projets de fin d'étude ainsi que des coopérations industrielles et universitaires. Plus de détails sur le co-encadrement peuvent être trouvés dans la section 7.1.

Chacun des travaux a permis de faire avancer le projet global, sans pour autant concerner la totalité du projet. De plus certains de ces travaux se sont succédés et des aspects développés durant une thèse de doctorat ont pu être utilisés dans d'autres travaux ou ont été continués et améliorés dans les travaux suivants. Pour cette raison, il ne semble pas intéressant de présenter les travaux de façon séparée, mais plutôt de façon thématique. Afin de souligner le travail de co-encadrement effectué, des liens vers des thèses sont régulièrement indiqués.

Le contexte du projet scientifique est présenté en Figure 1.9a. Les trois thèses que j'ai co-encadré qui sont déjà soutenues sont :

- **Contribution à l'étude de la valorisation des rejets thermiques - Étude et optimisation de moteurs Stirling** : Cette thèse Cifre en coopération avec Danielson Engineering effectuée par Juliette BERT avait comme but d'étudier la possibilité de valoriser les rejets thermiques dans des véhicules en utilisant un moteur Stirling. Elle donnait la possibilité de développer un modèle complet multi-physique et de le vérifier à l'aide d'une installation expérimentale. Le positionnement du travail est présenté en Figure 1.9b, le travail effectué est présenté en chapitre 6.
- **Effective Simulation Model and New Control Strategy to Improve Energy Efficiency in Hybrid and Electric Land Vehicle** : Cette thèse en coopération avec l'Université Technologique de Malaisie (UTM) effectuée par Zainab ASUS, a permis de développer une modélisation pour un véhicule hybride série de compétition, de faire des suggestions pour l'amélioration des performances basées sur des méthodes de

gestion nouvelles et de prévoir l'impact du remplacement du moteur thermique par une pile à combustible. Le positionnement du travail est présenté en Figure 1.9c, le travail effectué est présenté en sections 4.2.2 et 4.3.

- **Contribution à l'Étude du Comportement Thermique de la Batterie Lithium-ion pour Véhicules Electriques et Hybrides** : Cette thèse en coopération avec l'Université Technologique de Malaisie (UTM) effectué par Zul Hilmi CHE DAUD, afin de mieux comprendre le comportement thermique des batteries Lithium-ion a généré la conception d'une installation expérimentale et de l'utilisation méthodes d'analyse comme la PIV qui permet une étude approfondie. De plus un modèle multi-physique (électrique, thermique, fluidique) était développé pour souligner les observations. Le positionnement du travail est présenté en Figure 1.9d, le travail effectué est présenté en section 5.3.3.

Actuellement deux thèses de doctorat que je co-encadre sont en cours :

- **Stratégie intelligente de gestion du système énergétique global d'un véhicule hybride** : Cette thèse Cifre en coopération avec Danielson Engineering effectuée par Loïc JOUD vise à mieux comprendre le lien entre le comportement du conducteur, la consommation d'énergie et le gestion des composants. Le comportement des conducteurs est analysé avec une campagne d'essais utilisant un système de mesures et d'enregistrements des données développé sur place. Les résultats sont intégrés dans une simulation globale. Le positionnement du travail est présenté en Figure 1.10a, le travail effectué est présenté en section 2.4.
- **Développement d'un outil de gestion de véhicule hybride multi architecture/multi application** : Cette thèse Cifre en coopération avec SODEMO effectuée par Shiyu GAN a comme but d'étudier le fait que des véhicules hybrides sont prévus pour de multiples applications et chaque fois il se pose les questions de l'architecture, du dimensionnement des composantes et de la gestion la mieux adaptée. Afin de pouvoir répondre à ces questions une approche de modélisation complète est développée. Le positionnement du travail est présenté en Figure 1.10b, le travail effectué est présenté en section 4.6.

De plus j'ai eu la possibilité d'encadrer trois mémoires de Master :

- **Développement d'un générateur de cycles de conduite** : Ce mémoire de Master était effectué dans le contexte du master MEETING de l'ISAT par Irene GARCIA. Le travail a permis de développer un générateur de cycles de conduite artificiels, qui respecte les paramètres des cycles réalistes. Le positionnement du travail est présenté en Figure 1.11a, le travail effectué est présenté en section 2.2.
- **Dimensionnement des composants des véhicules hybrides sur leur durée de vie** : Ce mémoire de Master était effectué dans le contexte du master AESM de l'ISAT avec Polytech Orléans par Shiyu GAN. Dans la suite du travail sur les cycles de conduite, il était possible de dimensionner certains composants d'un véhicule en prenant en compte les différents cycles possibles sur toute leur durée de vie et leur vieillissement. Le positionnement du travail est présenté en Figure 1.11b, le travail effectué est présenté en section 2.2.
- **Modélisation multi-physique d'une pile à combustible PEM** : Ce mémoire de Master était effectué dans le contexte du master AESM de l'ISAT avec Polytech Orléans par Raaj Ganesh SAMIKANNU RAMESH. Les piles à combustibles sont des composants prometteurs pour remplacer les moteurs thermiques. Le travail a consisté en l'adaptation d'un modèle multi-physique existant pour représenter le comportement d'un dispositif expérimental disponible au laboratoire. Le positionnement du travail est présenté

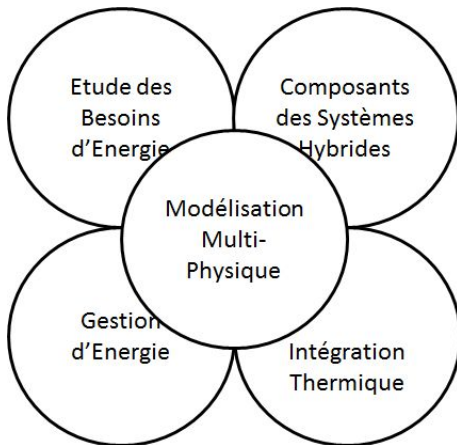
en Figure 1.11c, le travail effectué est présenté en section 5.4.

Finalement, deux projets de fin d'études que j'ai co-encadrés avec Alan KEROMNES nous ont permis de développer un modèle intéressant, qui lie le comportement des composants et la consommation du véhicule aux paramètres environnementaux.

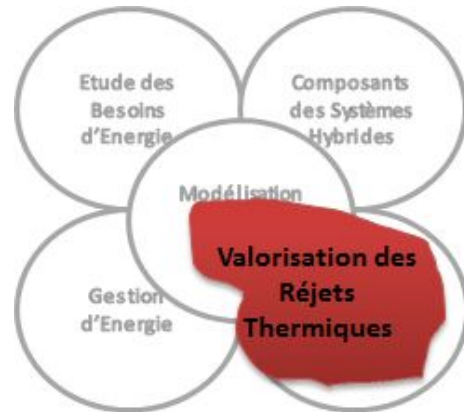
- **Étude de l'influence des paramètres environnementaux sur les besoins d'énergie des véhicules conventionnels et hybrides** : Ce projet de fin d'étude d'ingénieur de l'ISAT effectué par Baptiste VALET portait surtout sur la modélisation d'un véhicule thermique en respectant les influences environnementales. Le positionnement du travail est présenté en Figure 1.12a, le travail effectué est présenté en section 5.1.2.
- **Description des conditions environnementales à différents endroits et description du comportement d'une machine synchrone à aimants permanents** : Ce projet de fin d'étude de bachelor de l'UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID effectué par Carlos DAMAS portait surtout sur l'intégration des valeurs climatiques dans le modèle existant et d'amélioration de la description du moteur électrique. Le positionnement du travail est présenté en Figure 1.12b, le travail effectué est présenté en section 5.1.2.3 et 5.2.

Le projet scientifique présenté dans ce rapport m'a permis de publier six articles de journal, dont un en première auteur. Un autre article de journal est actuellement en préparation. J'ai également eu la possibilité de publier seize articles de congrès avec actes et sélection sur texte résumé, dont six comme premier auteur ainsi qu'un congrès international avec actes et sélections sur texte complet en tant que premier auteur. J'ai aussi été invité à quatre reprises à des conférences pour présenter mon travail. Les détails sur les publications se trouvent en section 7.5.

Le projet de recherche présenté a été reconnu scientifiquement au travers des séjours comme chercheur invité, ou encore des co-organisations de sessions spéciales, des participations aux comités d'organisation de congrès internationaux et en tant que reviewer pour des journaux scientifiques, (chapitre 6).



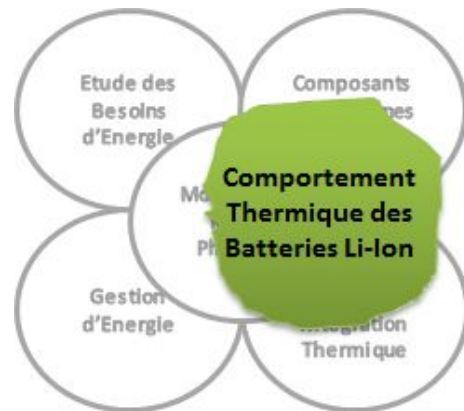
(a) Projet scientifique



(b) Valorisation Réjets Thermiques



(c) Simulation and New Control Strategy



(d) Comportement Thermique Li-ion Battery

FIGURE 1.9 – Positionnement des co-encadrements dans les doctorats terminés.

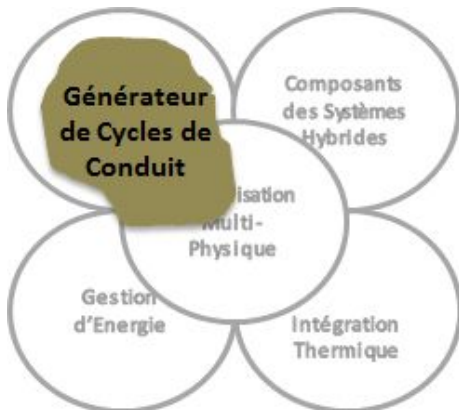


(a) Stratégie Intelligent de Gestion

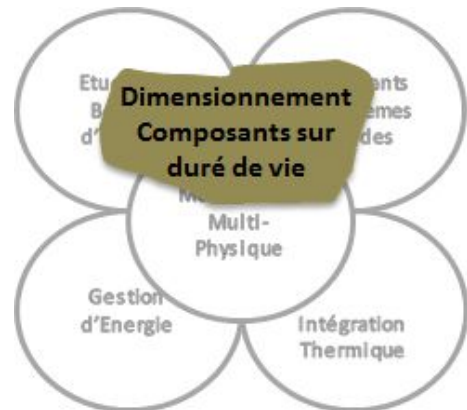


(b) Approche Multi-Architecture/Multi-Application

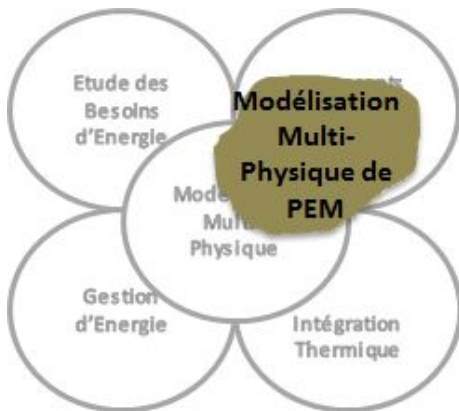
FIGURE 1.10 – Positionnement des co-encadrements dans les doctorats en cours.



(a) Générateur des Cycles de Conduit



(b) Valorisation Rejets Thermiques

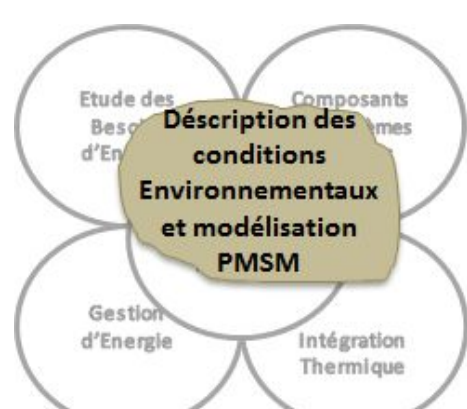


(c) Simulation and New Control Strategy

FIGURE 1.11 – Positionnement des co-encadrements dans les mémoires de master.



(a) Influence Paramètres Environnementaux



(b) Aspects Climatiques et MSAP

FIGURE 1.12 – Positionnement des co-encadrement des projets de fin d'études.

BESOINS RÉELS DES VÉHICULES

Pour pouvoir bien dimensionner et gérer un système hybride, il est nécessaire de connaître les besoins énergétiques d'un véhicule avec exactitude. Jusqu'à maintenant, on utilisait des cycles de conduite avec une vitesse en fonction du temps qui était à respecter. Ce chapitre montre l'intérêt d'une telle approche et ses limites. Avant de proposer des approches qui permettent de mieux connaître les besoins réels des véhicules et des méthodologies pour mieux les évaluer et les modéliser.

2.1/ LES CYCLES DE CONDUITE CONNUS

La plupart des cycles de conduite ont été conçus dans le but d'avoir des cycles comparables.

2.1.1/ CYCLES EUROPÉENS

Le cycle européen NEDC (New European Driving Cycle) est conçu en 1970 dans le but d'analyser la consommation de carburant et les émissions d'un véhicule dans un cadre bien défini qui était facilement et fiablement répétable sur des bancs d'essai. Il est composé de deux parties : une partie urbaine ECE-15 qui est répétée quatre fois suivie par une partie extra-urbaine EUDC. Pour cela, le cycle est constitué par un nombre limité de phases d'accélération, de vitesses constantes et de décélérations avec des valeurs modérées et des longueurs de phase relativement élevés (plusieurs secondes), Figure 2.1. De plus, il est valable uniquement pour des températures entre 20 °C et 30 °C.

Ce cycle bien défini a permis d'établir une base de comparaison de consommation pour tous les véhicules thermiques utilisés en Europe, mais il ne reflète à aucun moment la réalité de conduite.

Aujourd'hui il pose des problèmes dus au fait que le cycle proposé est très artificiel et donc facile à reconnaître. De plus, les constructeurs avaient la possibilité de choisir les véhicules à tester. Il était donc possible d'adapter un véhicule de série afin qu'il ait la meilleure performance. Pour ces raisons, le cycle NEDC sera remplacé par le cycle WLTC.

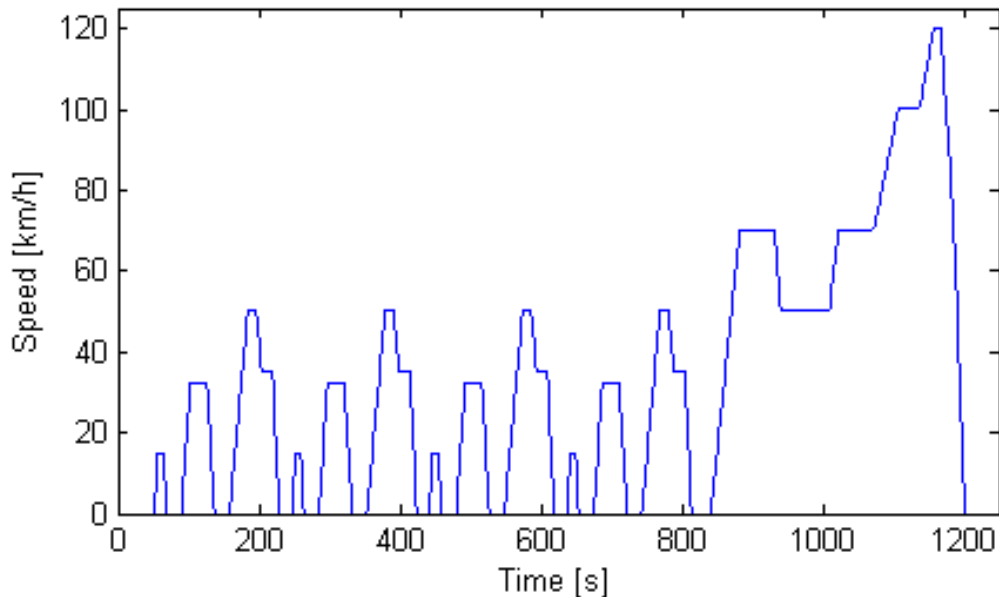


FIGURE 2.1 – Cycle de conduite européenne NEDC [23]

2.1.2/ CYCLES INTERNATIONAUX

Dans d'autres régions géographiques des cycles de conduite plus réalistes ont été choisis. Aux États-Unis, des cycles sont définis par la Federal Test Procedure (FTP) dans le but d'analyser les émissions au niveau de l'échappement. Ces cycles, qui sont prévus pour des véhicules légers, notamment les voitures, essaient d'être le plus réalistes possible en intégrant un style de conduite agressif avec des fluctuations de vitesse et l'utilisation d'un système de climatisation. Le plus connu est le cycle FTP 75, Figure 2.2.

Le cycle 10-15 a longtemps été utilisé au Japon pour évaluer les émissions et la consommation de carburant pour des véhicules légers, il ressemblait au cycle européen avec un cycle urbain répété trois fois suivi par un cycle extra urbain. Il est intéressant de noter que la vitesse maximale était assez limitée avec $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Il est remplacé par le cycle plus réaliste JC08 depuis 2010, Figure 2.3.

2.1.3/ CYCLES AMÉLIORÉS

Comme il y avait déjà des initiatives pour améliorer les cycles de conduite dans d'autres régions du monde, il est envisagé en Europe d'améliorer le cycle de conduite utilisé. Le projet de recherche ARTEMIS [26] a permis d'analyser l'utilisation des véhicules légers en Europe pas uniquement en fonction des distances, mais aussi d'après la répartition entre distances, le type de route (urbaine, extra-urbaine, autoroute), et les paramètres clés selon les types de route (vitesses moyennes, accélération positive moyenne, nombre et durée des arrêts). Basés sur ces études, différents cycles caractéristiques sont proposés, Figure 2.4.

Vu que les véhicules sont maintenant vendus partout dans le monde, l'initiative UNECE World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations [27] vise à établir un nombre de

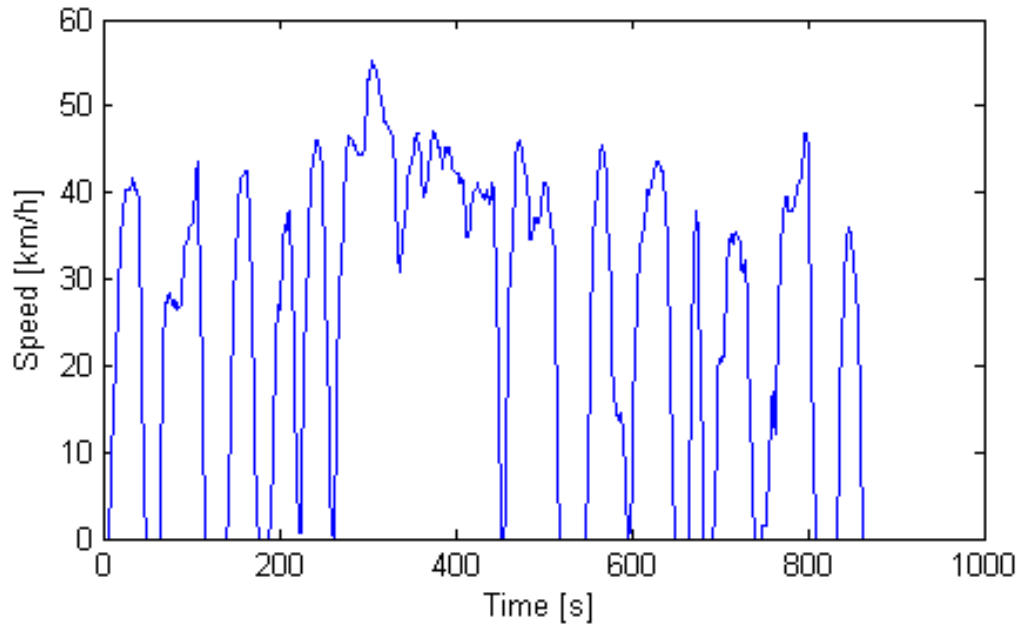


FIGURE 2.2 – Cycle de conduite FTP 75 partie en villé, proposé par l'US EPA [24]

cycles très restreint valable partout et appelé Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures (WLTP) [28]. Ces cycles ont la vocation d'être utilisés pour évaluer la pollution (notamment les émissions de dioxyde de carbone), la consommation de carburant mais également l'autonomie électrique pour les véhicules légers. Le plus représentatif est le cycle 3 pour des véhicules avec une puissance supérieure à 34 kW/t (Figure 2.5). Il reprend l'idée principale du cycle européen avec une longue phase de conduite en environnement urbain, suivi par une partie de conduite extra-urbaine, mais il contient des accélérations et décélérations plus fortes et plus variables que le cycle EUDC [29].

2.1.4/ CYCLES VS BESOINS RÉELS

Malgré tous les efforts, le nombre de cycles de conduite restera toujours limité et ils peuvent être reconnus. Surtout en Europe, on remarque que les consommations annoncées ne reflètent pas la réalité. Une des raisons de cette différence est le fait que les cycles artificiels peuvent facilement être reconnus par le contrôleur du véhicule. Cette reconnaissance facilite l'adaptation du fonctionnement du contrôleur du moteur thermique dans des conditions particulières d'essai et permet d'utiliser des points de fonctionnement qui garantissent un niveau faible d'émissions ou de consommation, même si ce mode de fonctionnement du moteur thermique n'est pas adapté pour une utilisation quotidienne. Des approches similaires ont été connues sous le nom du Volkswagen's Emissions Scandal [30].

Même le cycle le plus représentatif ne caractérise qu'un extrait des utilisations des véhicules durant leur vie. De plus, le même cycle de conduite est utilisé pour tous les types de véhicules avec les mêmes valeurs d'accélération et de décélération sans prendre en compte la puissance du véhicule ou le mode de conduite du conducteur, en

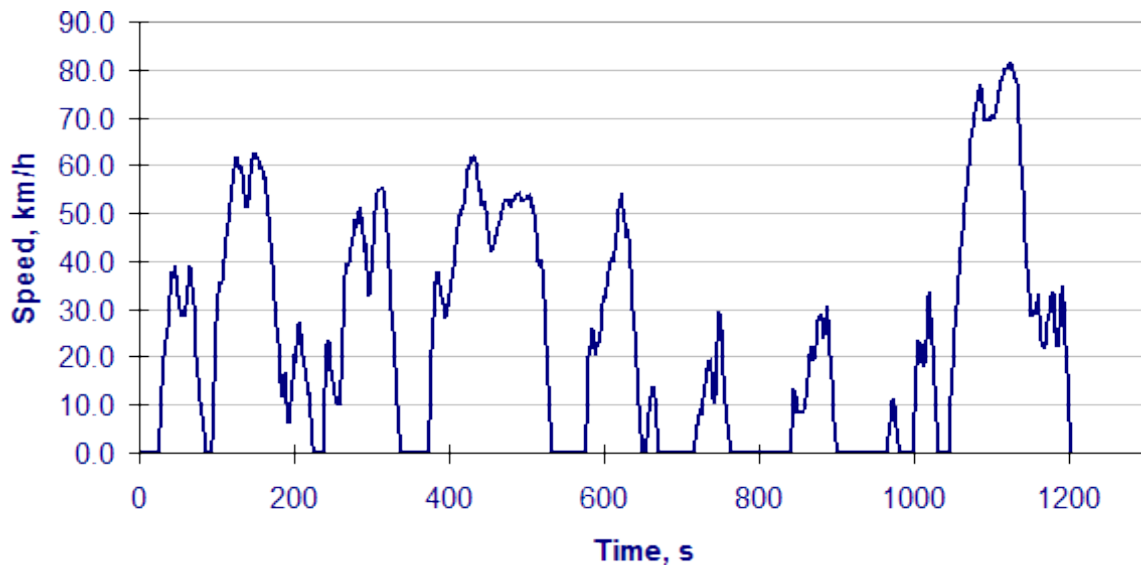
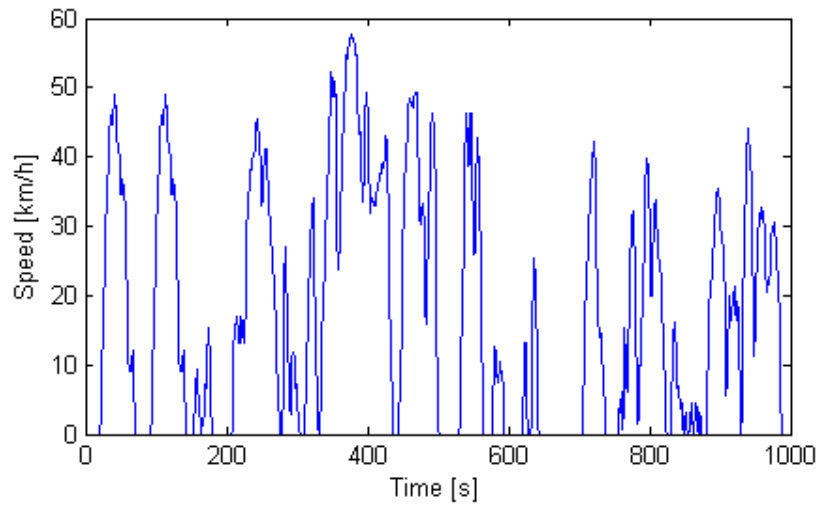
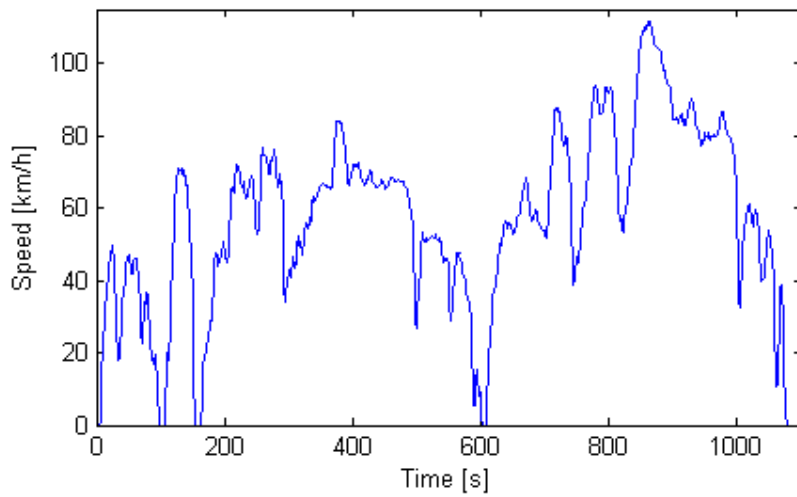


FIGURE 2.3 – Cycle de conduite JC08 [25]

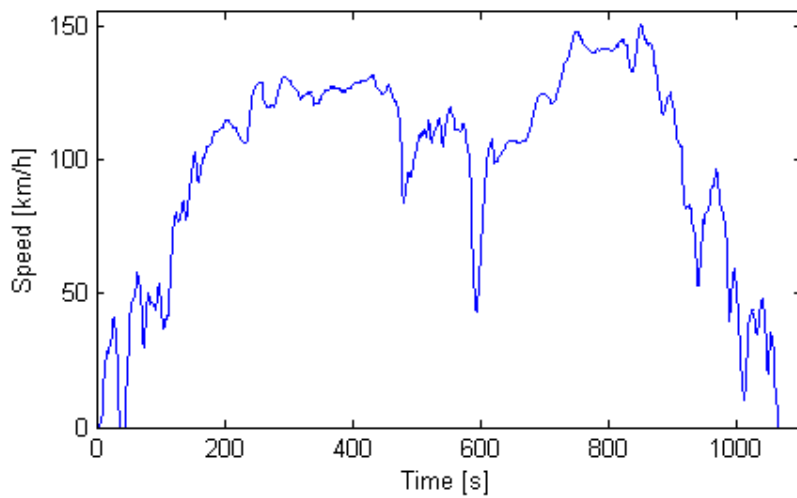
sachant que ces deux aspects peuvent varier fortement. Il reste donc à réfléchir si une représentation fixe de la vitesse en fonction du temps est l'approche la mieux adaptée.



(a) urban



(b) road



(c) motorway

FIGURE 2.4 – Cycles Artemis

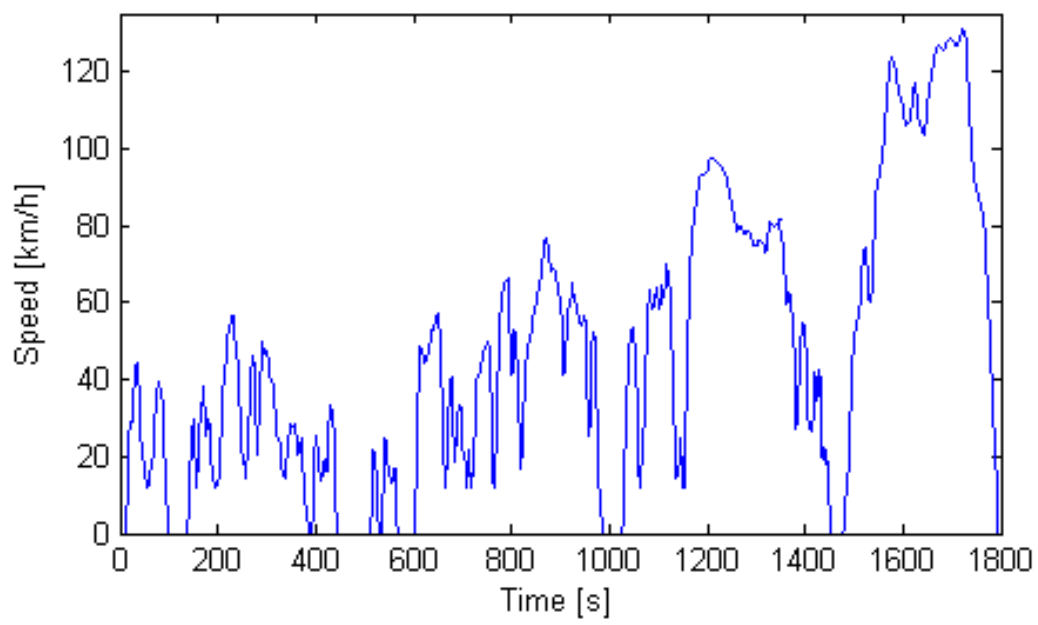


FIGURE 2.5 – Cycle de WLTC Cycle 3 [29]

2.2/ BESOIN D'ANALYSER/SIMULER LES CYCLES DE CONDUITE RÉELLE

En vue d'une amélioration de la gestion d'énergie dans les véhicules hybrides, l'utilisation d'un petit nombre de cycles bien connus n'est pas à conseiller, même si la plupart des études actuelles sont faites de cette manière [22]. Le risque est que la gestion proposée soit optimisée pour ce cycle précis mais suboptimal pour des circonstances réelles. L'idéal est d'évaluer la gestion d'énergie sur un large champ de situations réalistes qui peuvent arriver durant la vie du véhicule. C'est pour ça que dans un premier temps un générateur de cycles de conduite a été créé dans le cadre du mémoire de Master d'Irène GARCIA (paragraphe 7.1.2.1) [31].

Le générateur de cycles de conduite est basé sur la distribution normale et est paramétré pour différents types de cycle en utilisant les résultats du projet ARTEMIS [26]. Les conditions ou types de conduite peuvent être pris en compte facilement via le paramétrage du générateur.

L'approche théorique pour la génération des cycles de conduite est la suivante : tant que le cycle de conduite n'est pas terminé, des tronçons de conduite sont créés. Ces tronçons sont définis à travers leur longueur et la vitesse initiale du tronçon suivant. Pour cela, une distribution normale des longueurs des tronçons et des vitesses est utilisée. Ensuite une valeur d'accélération constante est calculée ainsi que la distance couverte durant la phase d'accélération. Les données principales (temps, vitesse, distance et accélération) sont sauvegardées dans le vecteur de sortie. Une représentation schématique de la création d'un cycle de conduite est donnée en Figure 2.6.

Le générateur de cycles de conduite est initialisé par la distance du cycle ; il est également possible de définir la longueur de différents types de route. Le générateur prévoit des arrêts comme on peut par exemple en rencontrer dus aux feux tricolores sur la route.

Pour adapter le cycle de conduite à différents types de route, il faut seulement faire varier quelques valeurs d'entrée. Les paramètres principaux à changer sont la vitesse moyenne et l'accélération moyenne. Ces paramètres peuvent être extraits, par exemple, des résultats du projet Artemis et sont présentés en Tableau 2.1. La correspondance entre les résultats du générateur de cycles de conduite et les observations du projet Artemis sont présentés en Tableau 2.2.

Afin de valider le générateur de cycles de conduite, ces résultats sont comparés avec un cycle réel qui contient des parties urbaines, extra-urbaines et autoroutières. Pour avoir une base de comparaison fiable, trois conducteurs différents ont effectué ce cycle à plusieurs reprises. Leurs cycles de conduite ont été enregistrés grâce à un enregistreur GPS avec une fréquence de 5 Hz. Ils se composent des parties suivantes ; (1) partie urbaine 1,4 km, (2) partie extra-urbaine 1,3 km, (3) partie sur autoroute 16,5 km avec la limitation

TABLE 2.1 – Paramètres d'initialisation pour générateur de cycles de conduite

	durée tronçon [s]		vit. moyenne [$\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$]		vit. maximale [$\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$]	
	moyenne	écart type	moyenne	écart type	moyenne	écart type
urbain	10	5	35	30	60	30
extra urbain	6	5	70	15	77	15
autoroute 110	13	3	110	27	115	27
autoroute 130	13	3	130	27	135	27

TABLE 2.2 – Caractéristiques de différents types de route [26]

	v_{mean}		$a_{positive}$	
	meas	gen	meas	gen
urbain	28	27.4	0.72	0.70
extra urbain	73	70.8	0.6	0.52
autoroute 110	115	110.23	0.53	0.18
autoroute 130	130	128.6	0.38	0.2

TABLE 2.3 – Types de Cycle [26]

Classe	% des cycles number	longueur (km)	vitesse (km/h)	acc+ (m/s ²)
autoroute 1	1.7	83.9	92.1	0.64
autoroute 2 irrégulier	1.2	78.5	92.8	0.66
route 1	10.2	11.0	41.6	0.71
route 2 longue	3.4	27.1	60.1	0.67
route 3 irrégulier	13.9	12.3	46.5	0.78
urbain 1 longue	19.4	4.5	21.5	0.80
urbain 2 irrégulier	36.2	3.3	24.4	0.77
urbain 3 vitesse faible	14.1	1.9	19.2	0.70

de vitesse qui change de $130 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ à $110 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ après 7,0 km, (4) partie extra-urbaine 1,6 km.

La comparaison entre le cycle de conduite mesuré et le cycle de conduite artificiel est présenté en Figure 2.7a. On peut voir que le cycle artificiel correspond bien au cycle réel au niveau du temps nécessaire pour parcourir les différentes parties et leurs vitesses. Le cycle artificiel prévoit des arrêts, notamment durant les parties urbaines avec les mêmes résultats que dans le cycle réel. L'observation du profil de vitesse en fonction du temps (Figure 2.7b) montre que les accélérations dans le cycle de conduite artificiel mènent à des vitesses un peu plus hautes que pour les cycles réels. En même temps, on peut voir que le cycle de conduite artificiel prévoit moins d'arrêts que le cycle de conduite réel [31].

Différentes améliorations sont appliquées sur cette approche de construction des cycles de conduite :

Vu qu'une approche de gestion doit être valable sur la totalité des cycles rencontrés durant la vie du véhicule, il est intéressant de pouvoir tester une gestion d'énergie sur toute la durée de vie du véhicule, car le comportement des composants clés comme les batteries va s'altérer [32].

Pour obtenir tous les cycles rencontrés durant la vie d'un véhicule, nous avons de nouveau utilisé les résultats du projet ARTEMIS. Dans ce contexte la longueur moyenne de différents types de cycles et le pourcentage de chaque type de cycle étaient analysés.

Ce travail initial a pu être continué dans le contexte du mémoire du Master de Shiyu GAN (paragraphe 7.1.2.2). Durant le master, les résultats présentés en Tableau 2.3, ont été utilisés pour perfectionner le générateur de cycles de conduite. Selon une sélection aléatoire un type de cycle était choisi, en respectant la distribution totale. La longueur du cycle était fixée autour de la longueur moyenne d'une distribution normale. Tous ces cycles étaient ajoutés en respectant une distance annuelle de 20 000 km et de 100 000 km au totale pour la durée de vie du véhicule.

L'exemple d'une série de cycles de conduite artificielles est présentée en Figure 2.8. Les parties sur autoroute peuvent être reconnues grâce à leur vitesse moyenne élevée. La différence entre les parties urbaines ou extra-urbaines se voit surtout au grand nombre d'arrêts dans les parties urbaines.

Les résultats des cycles de conduite sur la durée de vie ont été utilisés dans le contexte du travail de Master de Shiyu GAN pour dimensionner les composants d'un véhicule hybride série en prenant en compte le vieillissement des batteries [32]. Il s'avère que le choix d'un nombre limité de batteries peut entraîner une défaillance à leur niveau pendant la durée de vie du véhicule. Ceci est à éviter à tout prix, même si cela ajoute du poids supplémentaire. Il est également nécessaire d'avoir une taille de moteur à combustion interne minimale pour parvenir à la durée de vie prévue. En conclusion, pour les conditions données d'un véhicule hybride série de segment C [33] il faut une batterie Lithium-ion de 4 kW · h et un moteur à combustion interne de 40 kW ce résultat souligne les estimations présentées en [12].

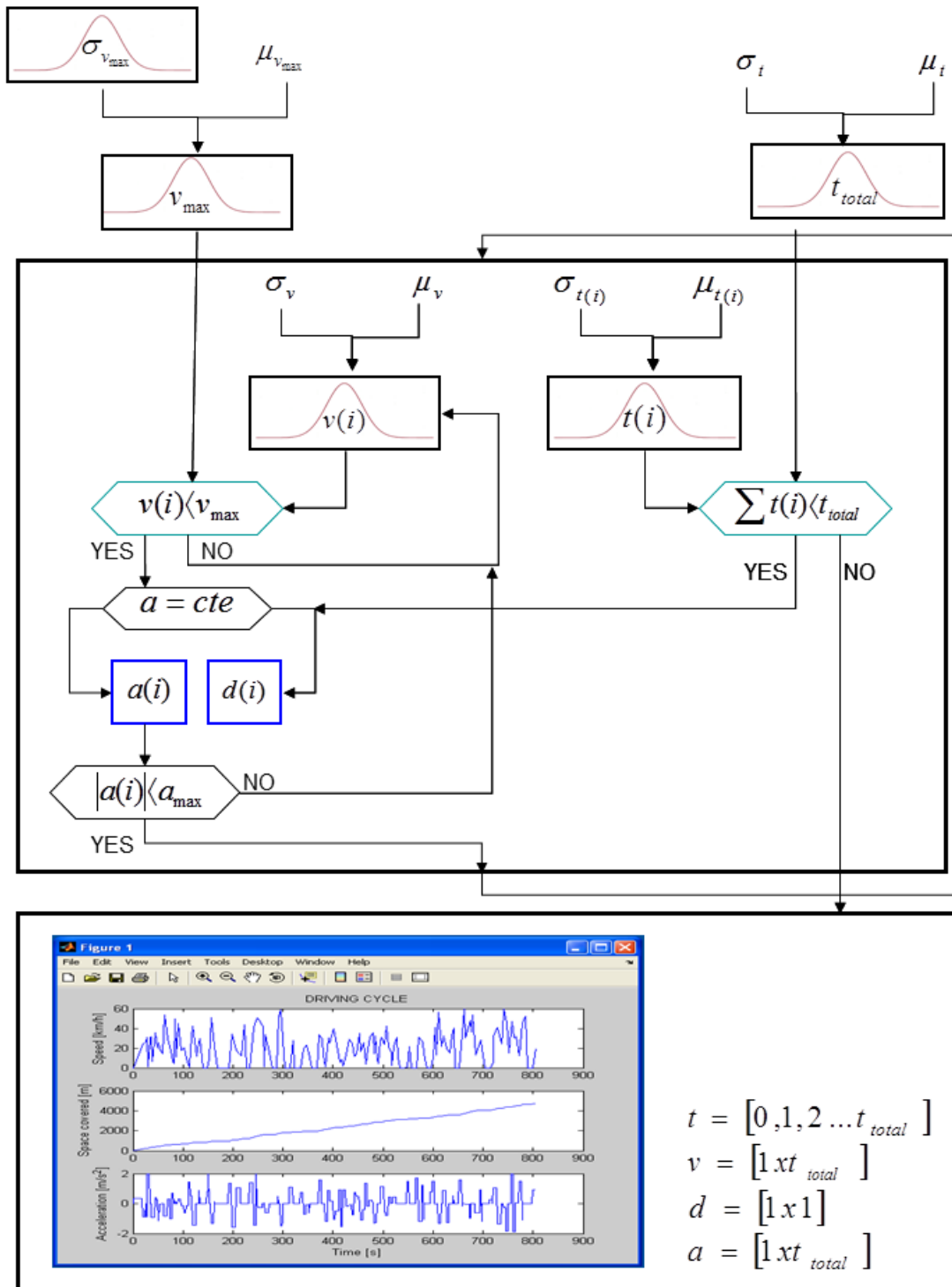
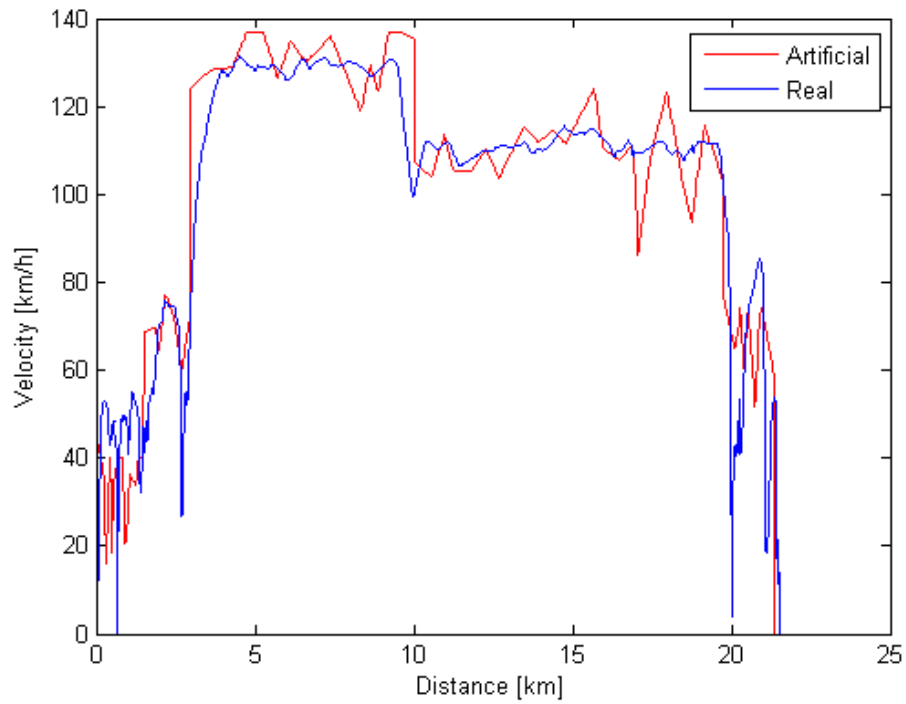
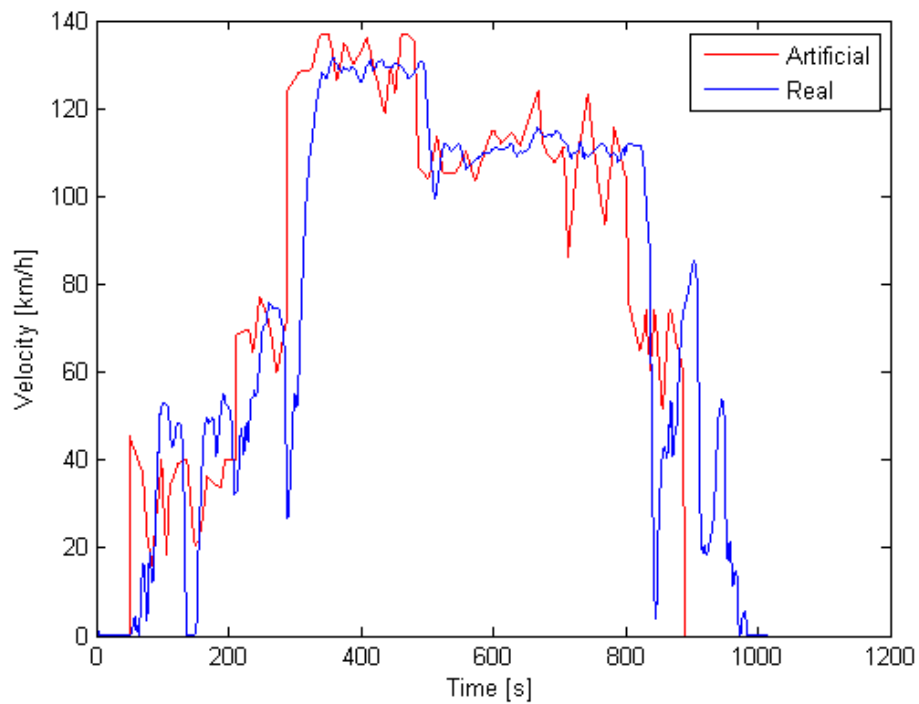


FIGURE 2.6 – Principe de fonctionnement du générateur de cycles de conduite



(a) Vitesse vs distance



(b) Vitesse vs temps

FIGURE 2.7 – Comparaison entre cycle de conduite réel et artificiel

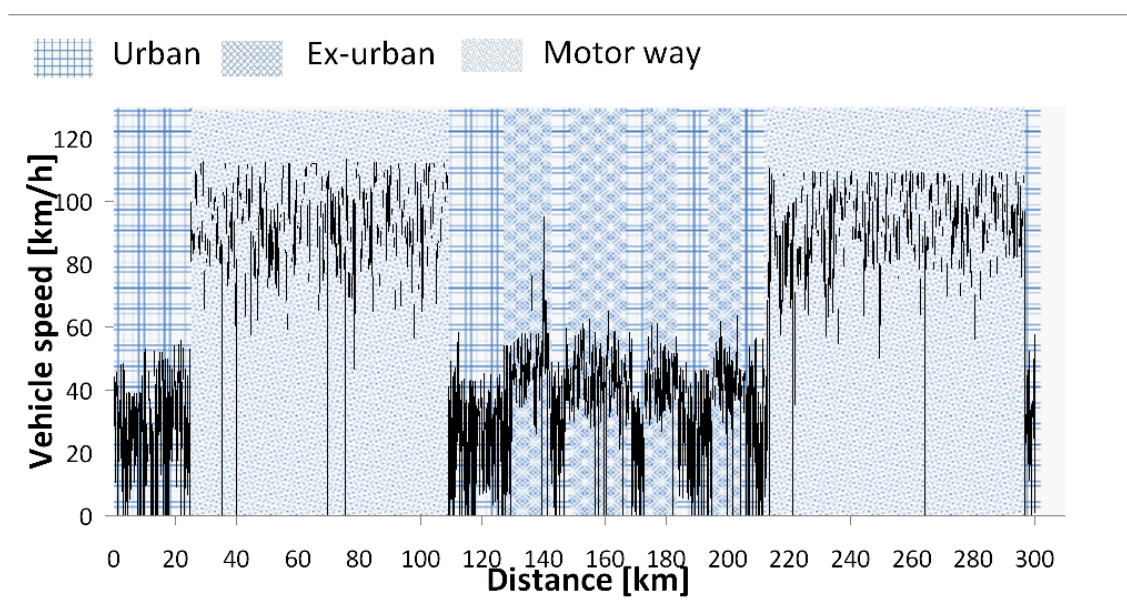


FIGURE 2.8 – Cycles artificiels pour une distance de 300 km

2.3/ VITESSE EN FONCTION DU TEMPS

Même si tous les cycles de conduite connus imposent une vitesse en fonction du temps, il faut vérifier cette approche. En réalité, on veut parcourir une distance donnée avec, dans le plus simple des cas, une accélération initiale, une vitesse constante, et une décélération finale. Les valeurs d'accélération, de vitesse maximale et de décélération dépendent à la fois des caractéristiques techniques du véhicule (puissance moteur), des conditions du trafic et des caractéristiques du conducteur [34]. Ces aspects ont été analysés en détail durant le mémoire du Master de Shiyu GAN (paragraphe 7.1.2.2), les résultats ont été utilisés et affinés durant le projet de fin d'études de Baptiste VALET (paragraphe 7.1.3.1).

2.3.1/ CONSTRUCTION D'UN CYCLE DE CONDUITE À PARTIR DE TRONÇONS [1]

Pour être plus réaliste que des cycles de conduite classiques qui imposent un vecteur de vitesse en fonction du temps, il est intéressant de construire des cycles de conduite en fonction des tronçons, des caractéristiques du véhicule, du conducteur, de l'état du trafic et des paramètres environnementaux. Chaque tronçon est décrit à partir de sa longueur (d en m), sa durée moyenne pour le traverser (t en s) et sa vitesse à la fin du tronçon (v_{end} en m/s). De plus, les valeurs d'accélération (acc) et de décélération (dec) doivent être connues, elles varient en fonction des caractéristiques techniques du véhicule et des caractéristiques du conducteur. Basé sur ces renseignements, un profil de vitesse en fonction du temps pour chaque segment peut être évalué avec une précision de 1 Hz. Au début du tronçon, le véhicule démarre selon sa valeur d'accélération jusqu'à l'obtention de la vitesse maximale (v_{max}). Cette vitesse maximale est définie en considérant le temps nécessaire pour accélérer et décélérer. Pour cela, on utilise la plus petite des racines carrées de l'équation 2.1. Cette valeur, qui est également liée à la durée moyenne pour traverser un segment t , peut varier selon les caractéristiques du conducteur.

$$0 = v_{max}^2 + 2v_{max}(t \cdot dec - v_{end}) - d \cdot dec + v_{end}^2 \quad (2.1)$$

A chaque instant, le temps de freinage nécessaire pour arriver à la vitesse de fin du tronçon est anticipé selon (Equ. 2.2).

$$d_{anti} = \frac{1}{2dec} (v_{end} - v_{actual})^2 + \frac{v_{actual}}{dec} (v_{end} - v_{actual}) \quad (2.2)$$

où l'annotation *actual* désigne la valeur instantanée, et la décélération est constante. Dès que la distance anticipée de freinage nécessaire est atteinte, le freinage commence.

Chaque tronçon contient donc une phase d'accélération, une phase de vitesse constante et une phase de décélération, Figure 2.9. Le résultat de cet effort de construction mène à un cycle de conduite classique décrit par un vecteur de vitesse en fonction du temps. Par contre ce cycle varie selon les caractéristiques du véhicule, du trafic et du conducteur. Afin d'améliorer la description des tronçons, il est également possible d'intégrer la pente de la route dans le cycle de conduite. Dans le cas le plus simple, l'influence de la pente est ajoutée à la valeur d'accélération et décélération (Equ. 2.3), [35].

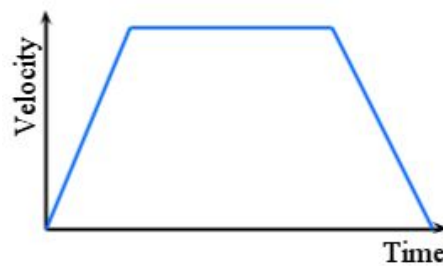


FIGURE 2.9 – Un segment du cycle de conduite

$$a = a + g * \sin(\alpha) \quad (2.3)$$

2.3.2/ EXTRACTION DES DONNÉES DES TRONÇONS EN UTILISANT DES LOGICIELS DE PLANIFICATION ROUTIÈRE

Au premier regard, la conception des cycles de conduite à partir des tronçons ne montre pas forcément un grand avantage comparé à des cycles de conduite classiques, même si elle offre la possibilité d'intégrer les caractéristiques du véhicule et du conducteur. Cependant, cette méthode est avantageuse lorsqu'elle est combinée aux données GIS (Geographic information system) issues d'un logiciel de planification routière. Il existe de multiples sources de planification routière qui fournissent des instructions sur les tronçons comme par exemple : "Turn left onto ... 800 m". De plus, il est possible d'accéder à des renseignements plus détaillés comme la durée nécessaire pour traverser un tronçon ou les coordonnées GPS du point de départ et d'arrivée du tronçon ainsi que leurs altitudes.

Tous les renseignements nécessaires pour prévoir un cycle de conduite sont donc disponibles : la longueur de chaque tronçon (d) et la durée pour le traverser. La pente peut être approximée en utilisant l'altitude initiale et finale dans chaque tronçon et les vitesses maximales peuvent l'être soit à partir du temps nécessaire pour traverser le tronçon ou soit être extraites du logiciel. La vitesse finale peut être évaluée selon l'information fournie pour le tronçon, si par exemple il est prévu de "turn left" il est probable que le conducteur doive s'arrêter avant de pouvoir tourner tandis qu'une indication "continue onto" n'impose pas de variation de vitesse.

Les seules valeurs qui doivent être définies en dehors des données disponibles sont l'accélération, la décélération et peut-être un facteur de vitesse maximale. Ces valeurs varient en fonction du comportement du conducteur et de la puissance du véhicule.

L'utilisation des logiciels de planification routière ont néanmoins des limites si, par exemple, les tronçons sont très longs, le profil d'altitude n'est pas très précis. Dans ce cas, il faut découper le tronçon en différentes parties plus courtes pour améliorer la précision. De plus, il n'est pas pris en compte dans ce modèle : la tenue de route dans les virages, la rencontre de feux tricolores ou de passages piétons ainsi que l'état du trafic. Il est possible d'améliorer les calculs avec des données plus affinées ou en utilisant les données du trafic actuel ou historique si disponible.

Des efforts comparables, mais plus détaillés, sont appliqués dans la coopération avec la Hochschule Karlsruhe [36].

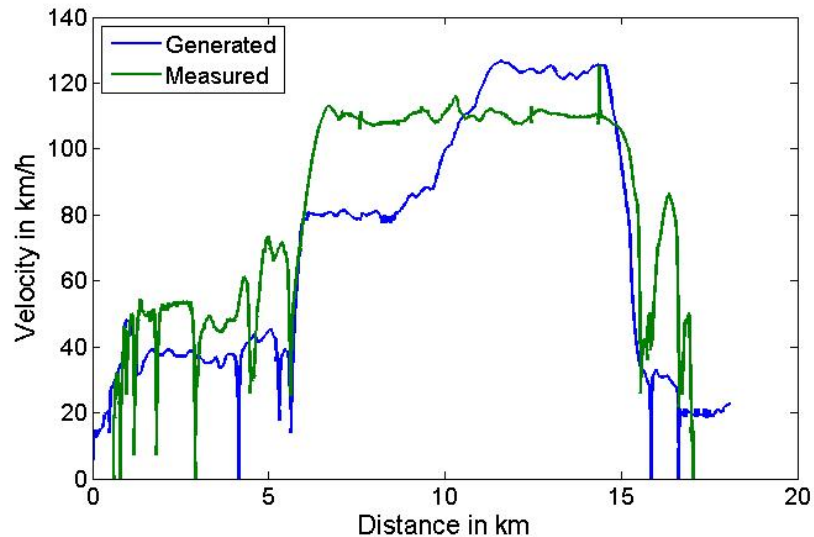


FIGURE 2.10 – Comparaison de cycle de conduite réel et construit

2.3.3/ COMPARAISON D'UN CYCLE DE CONDUITE MESURÉ AVEC UN CYCLE DE CONDUITE CONSTRUIT

Un cycle de conduite mesuré pour un véhicule de segment C [33] pendant des heures creuses est comparé avec un cycle de conduite construit à partir de l'approche introduite avant. Pour cela, les renseignements sur les tronçons présentés en Tableau 2.4 sont utilisés. Le cycle contient des parties urbaines, extra-urbaines et autoroutières avec une longueur totale de 18 km. Les résultats sont obtenus en utilisant un système de traçage GPS Qstarz BT-Q1000EX GPS avec une fréquence d'acquisition de 5 Hz. Les mesures ont été effectuées à dix reprises pour nous assurer que les résultats sont représentatifs [1, 37].

Ces dernières, sont présentées en Figure 2.10. En observant les cycles, on peut voir qu'en son milieu il y a une section qui est prévue avec une vitesse de 90 km/h, tandis que le cycle réel propose une vitesse de 110 km/h. Ceci peut être expliqué par le fait qu'au moment où les données ont été enregistrées pour les logiciels de planification routière, il y avait une zone de travaux avec une limitation de vitesse à 90 km/h.

Les résultats montrent que l'approche permet de construire des cycles de conduite représentatifs très intéressants pour différents types d'études, mais également qu'il y a des limitations par rapport à la représentation des conditions environnementales comme les feux rouges, les zones de travaux, les conditions climatiques ou la situation du trafic qui peuvent tous imposer des limitations supplémentaires.

2.3.4/ UTILISATION DU GÉNÉRATEUR DE CYCLES DE CONDUITE

Cette méthode pour créer des cycles de conduite peut être utilisée à différentes fins scientifiques.

Elle l'a été pour mettre au point une approche de prédiction de besoins d'énergie sur le cycle, qui peut être très intéressant pour en améliorer la gestion pour un véhicule

TABLE 2.4 – Séquences du cycle de conduite

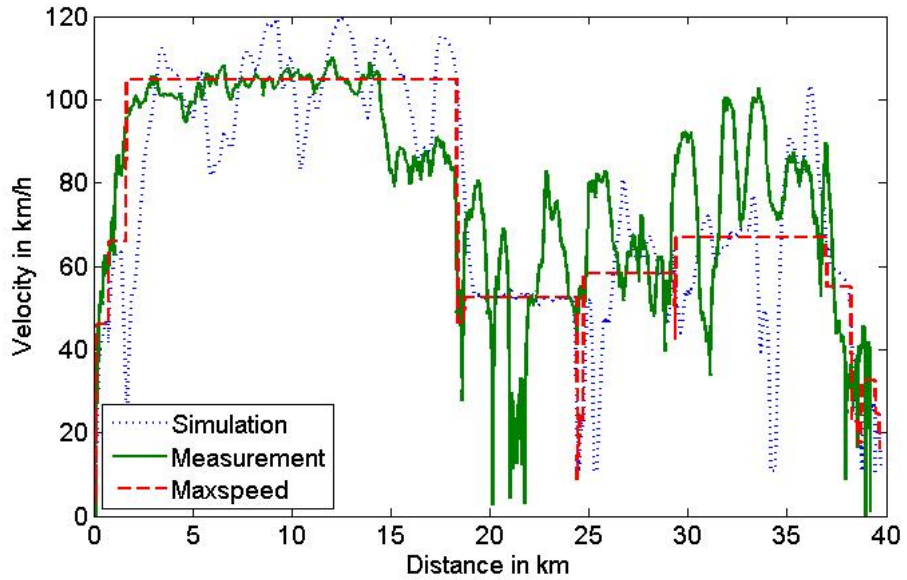
Instruction	Distance	Duration	Position		Altitude
Start			46.9908437	3.1631041	187 m
Head south on ...	33 m	3 s	46.990556	3.163045	186 m
Take the 1st right onto ...	88 m	18 s	46.9903959	3.161906	189 m
Turn left onto ...	366 m	100 s	46.9871853	3.1614299	181 m
Continue onto ...	356 m	36 s	46.9850647	3.1579276	176 m
At the roundabout, take the 2nd exit onto ...	3295 m	334 s	46.9562528	3.1573258	173 m
At the roundabout, take the 4th exit onto ...	1154 m	97 s	46.9574643	3.1711748	174 m
At the roundabout, take the 1st exit onto ...	344 m	34 s	46.9545404	3.17075	176 m
Merge onto ...	9211 m	313 s	46.876649	3.156799	187 m
Take exit 38 toward ...	393 m	21 s	46.874163	3.153409	184 m
At the roundabout, take the 4th exit, Go through 1 roundabout	594 m	84 s	46.8705417	3.1553836	189 m
Continue straight onto ...	489 m	30 s	46.867454	3.159943	199 m
At the roundabout, take the 1st exit and stay on ...	307 m	38 s	46.8655422	3.1571464	204 m

hybride. Cette approche prend les mêmes données de bases, mais crée un cycle encore plus simplifié, ce qui permet néanmoins de prévoir les besoins d'énergie correctement, Figure 2.11 [37].

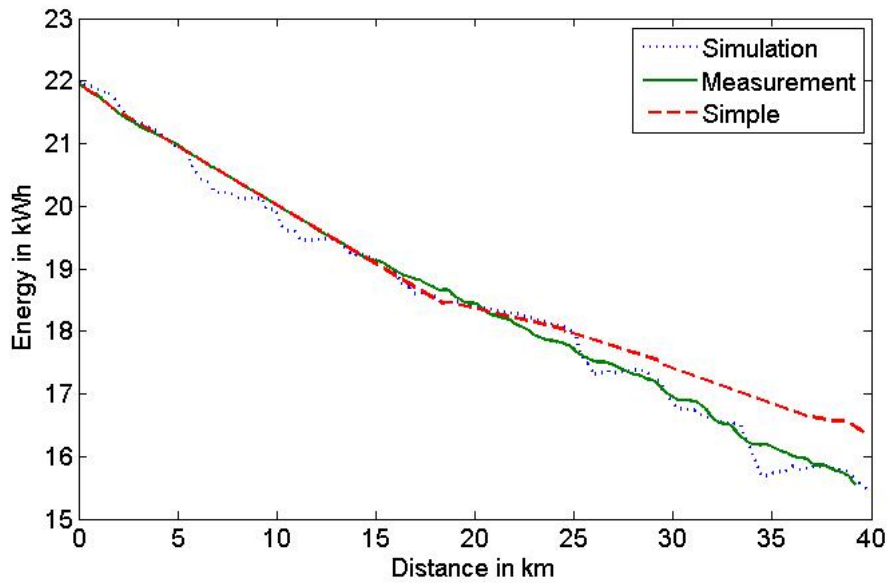
Une étude a été effectuée pour évaluer l'influence de l'éco-conduite sur la consommation selon différentes architectures de véhicule [1]. Une telle étude demande une approche modulaire de cycle de conduite, car une limitation de vitesse maximale va avoir une forte influence sur le cycle de conduite. Les résultats montrent qu'une diminution d'accélération et de vitesse maximale permettent une diminution de consommation considérable, mais imposent un temps de trajet plus long, Figure 2.12. Il reste à vérifier si cela est acceptable dans le flux du trafic.

Cette approche s'avère très utile et il faut continuer à la développer. Pour cela, la coopération avec la Hochschule Karlsruhe, son institut IEEM et surtout la coopération avec le doctorant Christian GUTENKUNST a permis d'analyser l'intégration d'autres paramètres comme le trafic, la topologie, les limitations de vitesse et l'étude de leurs influences sur les cycles de conduite [36].

Finalement, les influences des conditions climatiques et des caractéristiques de conduite sur la consommation dans différentes architectures de véhicule ont été étudiées durant les deux projets de fin d'études effectués par Baptiste VALET (paragraphe 7.1.3.1) et Carlos DAMAS (paragraphe 7.1.3.2). L'étude a surtout pris en compte les besoins énergétiques pour la climatisation de l'habitacle, l'influence de la température et la pression ambiante sur la puissance du moteur à combustion interne et les conséquences sur les performances d'accélération. Les détails sont présentés dans la section 5.1.2.



(a) Vitesse vs Distance



(b) Besoin d'énergie

FIGURE 2.11 – Comparaison entre cycle réel et cycle simplifié

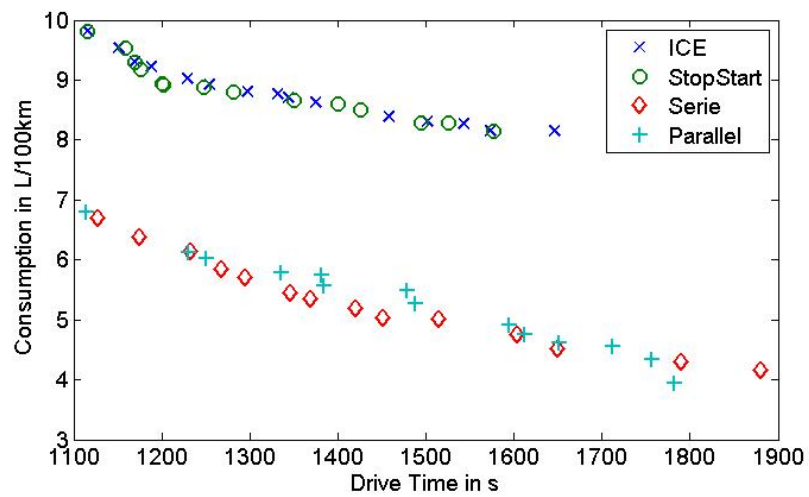


FIGURE 2.12 – Influence des architectures et caractéristiques d'éco-conduite sur la consommation et le temps de trajet



FIGURE 2.13 – Boîtier d'enregistrement

2.4/ ANALYSE DE L'UTILISATION RÉELLE

Même si la modélisation permet de créer des cycles de conduite réalistes, il est intéressant d'étudier l'utilisation réelle des véhicules pour savoir s'il existe un nombre de cycles limité qui est répété de façon régulière. À cette fin, la thèse Cifre de doctorat en coopération avec Danielson Engineering, effectuée par Loïc JOUD (paragraphe 7.1.1.4) a comme objectif d'analyser l'utilisation réelle de véhicules dans le contexte rural de la Nièvre. Pour cela dix boîtiers d'enregistrement autonomes sont conçus. Ils sont capables de mesurer le comportement du conducteur sur une durée de deux semaines, sans que la moindre connexion ou opération soit nécessaire. Le boîtier d'acquisition est composé d'un Arduino Uno Rev 3, d'une centrale inertielle 9 axes dont seul l'accéléromètre est utilisé à une fréquence de 10 Hz, d'un module GPS dont seule la trame RMC est récupérée à une fréquence de 10 Hz et d'une carte micro SD de 32 Go pour l'enregistrement des données. L'alimentation est assurée par 18 piles de batterie Lithium-ion de type 18650 avec un montage de neuf unités de deux cellules en série, reliées en parallèle. Le boîtier d'acquisition permet de mener une campagne d'essais sur une durée de plusieurs mois avec une cinquantaine de cobayes repartis respectant la répartition des différents types de conducteurs dans la Nièvre.

En premier lieu, nous regardons si des cycles habituels existent. Dans un deuxième temps, nous analyserons les besoins d'énergie pendant les cycles habituels avec un intérêt particulier sur leurs variations éventuelles. Si ces variations existent, il sera étudié de quels paramètres elles dépendent en testant les paramètres horaires, calendaires et météorologique.

La finalité du travail est de savoir si un effort particulier sur la gestion d'énergie sur des cycles habituelles est nécessaire afin de proposer (si c'est le cas) une gestion qui reconnaît les cycles habituelles et qui arrive à s'adapter en fonction des résultats de la reconnaissance. Le travail donnera lieu à une gestion prédictive innovante, voir également section 3.3.1.2.

GESTION D'ÉNERGIE

3.1/ GESTION D'ÉNERGIE DANS LES VÉHICULES HYBRIDES

Comme introduit dans le chapitre 1, les véhicules hybrides ont la vocation de réduire la consommation et les émissions des véhicules. En même temps, les véhicules hybrides sont composés de plusieurs sources, stockages ou convertisseurs d'énergie et ont donc une architecture plus complexe et probablement plus lourde qu'un véhicule thermique. Pour qu'un véhicule hybride montre donc un gain de consommation, il faut être dans des zones d'utilisation qui permettent un meilleur rendement.

Le principal objectif de la gestion de l'énergie du système hybride est de répondre à la demande du conducteur pour la puissance de traction, en gérant des contraintes comme le maintien de la charge de la batterie, le nombre minimal d'allumages du moteur à combustion interne, tout en diminuant les coûts de fonctionnement et en optimisant l'efficacité du groupe motopropulseur. Une bonne stratégie de commande doit offrir un compromis entre ces différents objectifs qui peuvent s'opposer.

Durant la thèse de Zainab ASUS (paragraphe 7.1.1.2) la gestion d'énergie dans un véhicule série de compétition est analysée et reproduite dans une modélisation. Basée sur cette modélisation, vérifiée par des mesures expérimentales, une approche de programmation dynamique est développée et permet de prédire le pourcentage de réduction de consommation de carburant ou de gain du temps par tour (section 4.2).

La thèse de Loïc JOUD (paragraphe 7.1.1.4) a pour but de trouver la gestion la plus adaptée pour des cycles habituels, la gestion qui sera testée en priorité est la commande prédictive basée sur modélisation (paragraphe 3.3.1.2).

Dans la thèse de Shiyu GAN (paragraphe 7.1.1.5) le but est de faire une optimisation globale d'un système qui inclut à la fois des aspects de dimensionnement des composants et la gestion d'énergie. Deux approches de gestion sont appliquées en particulier : la programmation dynamique déterministe (paragraphe 3.3.2.2) comme référence globale et une gestion déterministe (section 4.1) qui dépend uniquement de quelques paramètres basiques et qui peut être adaptée très facilement. Le but est de connaître le gain de rendement possible entre une gestion optimale et une gestion simple.

Si on étudie la consommation ou le rendement d'un moteur à combustion interne et ses points de fonctionnement, comme ce fut le cas durant la thèse de Zainab ASUS (paragraphe 7.1.1.2) on voit facilement, que beaucoup de points d'utilisation se trouvent loin du rendement optimal.

La combinaison avec d'autres composants comme des batteries ou des moteurs

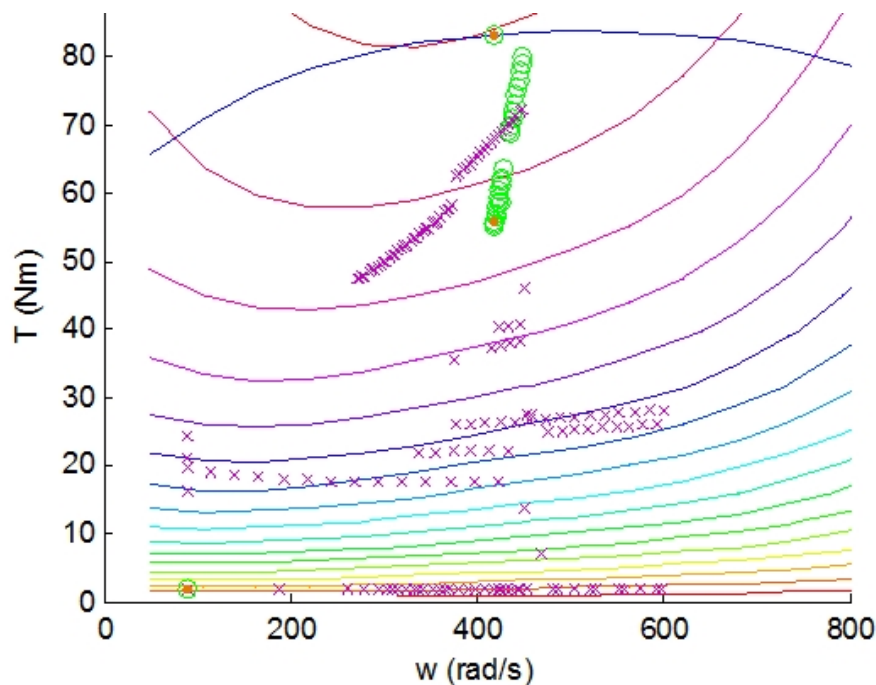


FIGURE 3.1 – Points de fonctionnement du MCI pour cycle EUDC. Véhicule MCI (magenta), véhicule hybride série (vert). [thèse ASUS]

électriques permet d'améliorer le rendement, car ces composants ont des rendements avantageux sur une large plage de points de fonctionnement, Figure 3.2. L'utilisation de la batterie en combinaison avec le moteur électrique dans des moments où le moteur à combustion interne montre des rendements désavantageux peut donc être intéressant, même si les batteries doivent être ensuite rechargées en utilisant le moteur à combustion interne. Ceci est intéressant uniquement si la recharge a lieu à un point de fonctionnement avantageux pour le moteur à combustion interne.

Un autre avantage des véhicules hybrides est la possibilité de récupérer de l'énergie lors des freinages. Dans ces cas, la machine électrique est utilisée en tant que générateur et l'énergie peut être stockée dans les batteries. Même si une récupération est possible, elle rencontre néanmoins des limites. D'un côté, la machine électrique est conçue pour fonctionner en tant que moteur et pas en tant que générateur, imposant une limitation de rendement. De plus, dans la plupart des cas, un seul train du véhicule est électrifié. Pour des soucis de stabilité, il faut néanmoins freiner sur les deux trains, ceci engendre la perte d'une partie de l'énergie. De plus, les batteries sont souvent limitées en courant récupérable (en général la moitié ou le quart du courant qui peut être fourni pour la propulsion), ce qui limite la puissance maximale qui peut être récupérée. Finalement, l'énergie de freinage peut uniquement être stockée quand la batterie n'est pas pleine. En même temps on souhaite avoir de batteries remplies pour pouvoir profiter de l'énergie à tout moment. Ces deux objectifs s'opposent [14, 38, 39].

Une configuration hybride intéressante est l'hybride plug-in, qui a une autonomie électrique d'environ 20 km [40] et une batterie qui peut être rechargée par le secteur. Dans une optique de diminuer la consommation de carburant et les émissions de dioxyde de carbone, il est donc souhaitable d'arriver à destination avec une batterie vide pour la

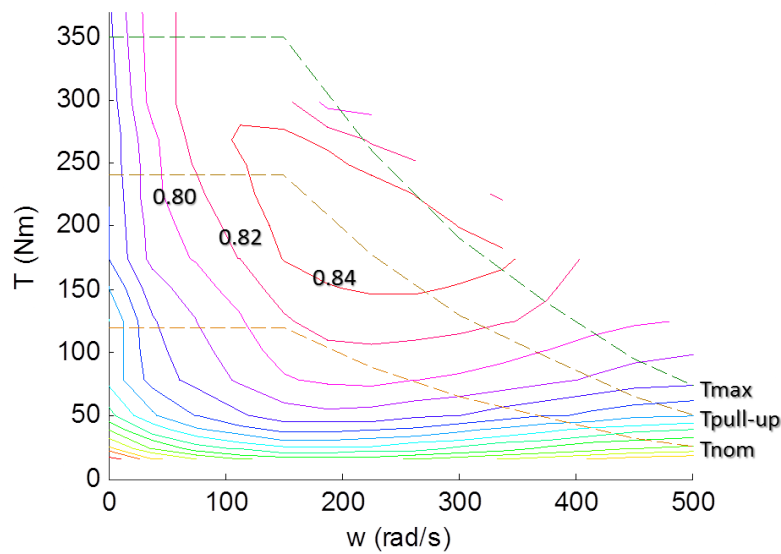


FIGURE 3.2 – Rendement d'un moteur électrique [thèse ASUS]

recharger par le secteur en espérant que l'énergie électrique soit produite à base de ressources renouvelables ou peu polluantes. En même temps, il faut garder une certaine quantité d'énergie dans la batterie pour éviter l'utilisation du moteur à combustion interne à des points de faible rendement.

C'est pourquoi, il est intéressant de connaître la distance restante (et la possibilité de recharge à destination) pour gérer le système, de sorte que le stockage d'énergie ne soit épuisé qu'au moment d'arriver [41, 42, 43, 44].

Cette introduction montre la complexité de la gestion d'énergie au sein d'un véhicule hybride et l'intérêt de connaître la suite du parcours. Il existe différentes méthodes de gestion entre les approches déterministes non optimisées et les approches d'optimisation en temps réel et globales. Ces approches sont présentées en lien avec le projet scientifique.

3.2/ CONTRÔLE DÉTERMINISTE

Des approches déterministes pour la gestion d'énergie dans des véhicules hybrides traduisent l'expertise humaine dans des modèles mathématiques avec le but d'optimiser les points de fonctionnement pour qu'ils se rapprochent au mieux des rendements optimaux sans avoir besoin de paramétrer le système avant le parcours. On peut séparer les approches déterministes dans deux groupes, les approches basées sur des lois (rule based) et les approches basées sur la logique floue.

Parmi les approches basées sur les lois il y a notamment l'approche thermostat (on/off) ou utilisateur de charge (charge deplete) qui est basée sur l'idée d'utiliser au maximum l'énergie stockée dans la batterie. Quand la charge de la batterie arrive à son seuil bas le moteur à combustion interne est allumé à son point de fonctionnement optimal et fournit de l'énergie. Celui-ci sera en même temps utilisé pour la propulsion et pour recharger la batterie jusqu'à son seuil de charge maximum. Cette approche est très bien adaptée pour des véhicules hybrides série ou des véhicules qui ont une utilisation bien définie avec beaucoup d'arrêts comme les bus en ville.

Une deuxième approche est le suivi de puissance appelée power follower method (qui est aussi parfois appelée la méthode de maintien de charge ou charge sustain method). Cette approche vise une utilisation du moteur à combustion interne en fonction des besoins de puissance, tout en maintenant le niveau de charge de la batterie à un niveau constant, pour que l'énergie stockée soit utilisée principalement durant les moments de forte dynamique.

L'approche du suivi de puissance est surtout appliquée dans des véhicules hybrides parallèle et/ou des mild hybrides avec une capacité de stockage électrique limitée. Elle sollicite le moteur à combustion interne sur un champ de points de fonctionnement plus grand.

Même si les approches sont basées sur l'expérience et sur aucune optimisation mathématique, il est possible d'obtenir de très bons résultats avec la commande déterministe. Par contre, si d'utilisation sort de la plage de base, les résultats peuvent se dégrader considérablement et le système peut même perdre sa stabilité. Une solution est de prendre en compte une grande variation de paramètres d'entrée pour couvrir une large plage de conditions de fonctionnement, mais accepter que le système ne fonctionne pas selon ses meilleures capacités [41].

Pour l'instant, la plupart des véhicules hybrides commercialisés utilisent des approches déterministes mais très développées pour la gestion de l'hybridation [14].

3.3/ STRATÉGIES DE COMMANDE BASÉES SUR L'OPTIMISATION

Dans l'optimisation de gestion d'énergie il y a, comme introduit par Khaligh et Li [45] et confirmé par Zhang et al. [46] ainsi que Chrenko et al. [47], deux grands groupes d'optimisation, l'optimisation globale et l'optimisation en temps réel.

Parmi les stratégies de commande basées sur l'optimisation, les valeurs de gestion peuvent être trouvées en minimisant une fonction des coûts par rapport à la consommation d'énergie ou les émissions. L'optimum global peut uniquement être obtenu si l'optimisation est effectuée sur le cycle complet. Il n'est donc pas possible d'effectuer une

optimisation durant le cycle ou en temps réel avec ces approches. Il est néanmoins possible d'utiliser des approches transitoires pour obtenir une fonction de coût instantanée. Même si les solutions obtenues à l'aide des approches transitoires ne représentent pas une optimisation globale, elles restent pertinentes pour les applications en temps réel.

3.3.1/ OPTIMISATION TRANSITOIRE

3.3.1.1/ STRATÉGIE DE MINIMISATION DE LA CONSOMMATION ÉQUIVALENTE (ECMS)

Parmi les stratégies d'optimisation transitoire la stratégie de minimisation de la consommation équivalente, souvent appelée Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS) vise à minimiser les coûts liés à la totalité des utilisations d'énergie. L'ECMS est utilisée dans les thèses de Zainab ASUS (paragraphe 7.1.1.2), et Loïc JOUD (paragraphe 7.1.1.4) et prévu d'être utilisée également dans le doctorat de Shiyu GAN (paragraphe 7.1.1.5). Même si la ECMS a des bons potentiels, elle est très sensible aux facteurs d'équivalence.

La ECMS est un moyen pour évaluer la consommation totale d'un véhicule hybride. Pour cela le flux d'énergie depuis et vers l'élément de stockage secondaire est calculé grâce à un facteur d'équivalence. Sur cette base une fonction des coûts instantanés peut être calculée et minimisée en choisissant la valeur adaptée de commande pour le partage de puissance. La consommation totale équivalente est alors la somme de la consommation réelle de carburant pour le MCI et la consommation équivalente de la machine électrique à travers le stockage secondaire qui est la plupart de temps une batterie. Ceci permet une représentation unique des deux sources d'énergie (MCI et stockage secondaire).

La fonction des coûts est :

$$J(x) = \dot{m}_{ICE}(k) + \dot{m}_{bat,eq}(k) \quad (3.1)$$

avec $\dot{m}_{ICE}(k)$ le débit de carburant du MCI. $\dot{m}_{bat,eq}(k)$ le débit de carburant équivalent pendant la charge et la recharge de la source secondaire, et k le pas discret du temps.

Z. Asus et al. [2] utilisent l'ECMS pour gérer l'énergie dans un véhicule hybride série de compétition comme présenté en paragraphe (4.2).

Une ECMS adaptative (A-ECMS) est présentée par Mursado et al. [48] où l'idée principale est de rafraîchir périodiquement les paramètres de commande en fonction du type de route actuel.

A. Chasse et al. [49] utilisent l'ECMS en temps réel et vérifient l'approche dans un environnement expérimental. Une gestion d'énergie et de puissance optimisée pour des véhicules de chantier est présentée par Froberg et al. [50]. J. Lescot et al. [51] proposent une commande de supervision pour des véhicules hybrides basée sur l'ECMS.

3.3.1.2/ COMMANDE PRÉDICTIVE BASÉE SUR LA MODÉLISATION

La commande prédictive basée sur la modélisation (Model predictive control - MPC) est une autre stratégie d'optimisation transitoire qui est utilisée dans le contexte de ce projet de recherche. Elle permet de faire une optimisation en prenant en compte une prédiction sur le comportement futur. La MPC semble particulièrement intéressant dans le contexte des trajets habituels pour lesquels les états futurs peuvent être prédits à partir des cycles antérieurs. Cette gestion d'énergie est étudiée dans le contexte de la thèse du doctorat

de Loïc JOUD (paragraphe 7.1.1.4). Cependant il n'est pas évident de choisir la durée d'horizon de prédiction, qui est en général d'environ 20 s. De plus cette approche de gestion est souvent basée sur des modèles linéarisés et une linéarisation n'est pas évidente sur des systèmes non linéaires comme les véhicules hybrides.

La MPC est une méthode avancée de la commande utilisée dans des procédures industrielles au sein d'usines chimiques ou de raffineries depuis les années 1980. Elle est basée sur des modèles dynamiques du processus, le plus souvent des modèles linéaires empiriques obtenus par une identification du système. L'avantage principal de la MPC est le fait qu'elle permet d'optimiser la plage temporaire actuelle en prenant en compte les plages horaires futures. Ceci est fait en optimisant le système avec un horizon temporaire fini, et en implémentant uniquement la plage temporaire actuelle.

Pour améliorer la compréhension de la stratégie MPC, on peut prendre l'exemple du déplacement d'un véhicule doté d'un GPS comme moyen de prédiction. Ce système peut aider à minimiser les coûts liés au carburant durant le cycle. Au modèle prédictif, on ajoute les contraintes imposées par le code de la route et les éventuels manques d'attention du conducteur.

La loi de retour de la commande prédictive est calculée en minimisant le coût de performance prévu x , qui est défini en fonction de la séquence prédictive u . Le système est décrit en utilisant une fonction de coût quadratique, dans laquelle le coût prédit est en général présenté par [52, 53] :

$$J(k) = \sum_{i=0}^N \left[x^T(k+i|k)Q \cdot x(k+i|k) + u^T(k+i|k) \cdot R \cdot u(k+i|k) \right] \quad (3.2)$$

où Q , R sont des matrices définies comme positive (Q peut être semi-définie positive). J est la fonction de coût qui dépend de $u(k)$, et la séquence d'entrée optimale du problème de minimisation est $u^*(k)$:

$$u^*(k) = \arg \min_u J(k) \quad (3.3)$$

Si le système a des contraintes par rapport aux entrées et aux états, celles-ci peuvent être incluses dans l'optimisation comme contraintes équivalents $u(k)$.

S. Grubwinkler et al. [54] proposent un système modulaire basé sur un cloud afin de calculer correctement l'énergie nécessaire (autonomie) à partir de trois valeurs de prédiction avec des degrés variables de justesse et de complexité pour différents types d'utilisation en considérant les comportements de conduite individuels et en prévoyant des ralentissements.

D. Karbowski et al. [55] présentent une méthode d'optimisation de la gestion d'énergie dans un véhicule hybride plug-in en utilisant une prédiction stochastique du cycle basée sur un système géographique d'information (Geographical Information System GIS). Ensuite, la stratégie de commande est implémentée sur le modèle et comparée avec une stratégie heuristique.

3.3.1.3/ AUTRES APPROCHES D'OPTIMISATION TRANSITOIRE

D'autres approches d'optimisation transitoire pour la gestion d'énergie dans des véhicules peuvent être intéressantes, mais le projet scientifique présenté ne les intègre pas encore :

La commande robuste transitoire est une partie de la théorie de contrôle où la conception du contrôleur inclut explicitement des états incertains. Dans ce domaine de recherche, les

méthodes sont conçues afin qu'elles fonctionnent bien même si certains paramètres sont incertains ou bruités. Des méthodes robustes ont pour but de réaliser une performance robuste et/ou assurer une stabilité en présence d'erreurs de modèle.

R. Sampaio et al. [56] font une synthèse et une analyse des approches de commandes robustes pour des vitesses urbaines (en dessous de $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) et pour des véhicules hybrides obtenus par l'ajout d'un train électrique arrière.

La commande transitoire découplée utilise quelques structures spécifiques pour trouver des lois de commande adaptées afin d'éliminer certaines relations entre différentes boucles de commande dans un système. Le but recherché vise à faire correspondre chaque paramètre d'entrée à une seule valeur de sortie et que chaque valeur de sortie puisse être contrôlée par seulement un signal d'entrée [57].

La commande du flux de puissance dans un véhicule hybride est une tâche exigeante à cause de la structure complexe du système de propulsion hybride et des objectifs de commande opposés : minimisation de la consommation de carburant, régulation de l'état de charge (SOC) et respect du cycle de conduite. La flexibilité de l'architecture d'un système de propulsion hybride moderne permet la conception d'une gestion d'énergie par découplage qui permet de mieux répondre à la question.

3.3.2/ OPTIMISATION GLOBALE

L'optimisation globale nécessite l'entière connaissance du cycle de conduite comprenant l'état de charge de la batterie, les conditions du cycle, les réponses du conducteur et la prédiction du cycle. Elle peut être un outil adapté pour l'analyse, le design et l'évaluation des systèmes de commande. Elle ne peut être mise en place dans des applications pratiques à cause de la complexité des calculs qu'elle nécessite.

Différentes approches d'optimisation globale peuvent exister, comme l'optimisation globale avec la théorie des jeux qui était utilisée pour des véhicules hybrides par H. Chen et al. [58]. Une autre approche prometteuse est l'optimisation globale avec algorithme génétique présentée en paragraphe 3.3.2.1. L'approche d'optimisation globale la plus répandue est désormais la programmation dynamique (DP). La programmation dynamique est reconnue dans le monde des véhicules hybrides comme la valeur de référence [59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68]. Pour cette raison la DP est utilisée dans la thèse de Zainab ASUS (paragraphe 7.1.1.2) afin de quantifier la qualité de la gestion déterministe actuelle et pour prédire le comportement du véhicule dans différentes circonstances (section 4.3). Dans la thèse de doctorat de Loïc JOUD (paragraphe 7.1.1.4) la DP est utilisée afin de quantifier la gestion prédictive proposée pour des cycles de conduite habituels. Finalement, dans le contexte de la thèse de doctorat de Shiyu GAN (paragraphe 7.1.1.5), la gestion par DP est utilisée comme indicateur de qualité des gestions prédictives et ECMS qui seront optimisés pour des multiples architectures de véhicules hybrides utilisés dans de multiples applications.

3.3.2.1/ OPTIMISATION GLOBALE AVEC ALGORITHME GÉNÉTIQUE

Les algorithmes génétiques (Genetic algorithms GA) sont inspirés par la théorie d'évolution de Darwin. L'algorithme débute avec un ensemble de solutions (représenté par des chromosomes) appelé population. Les solutions pour une population sont analysées et utilisées par une nouvelle population, en partant du principe que la nouvelle population

sera mieux que l'ancienne. Les solutions qui sont sélectionnées pour créer la nouvelle solution (offspring) sont choisies, selon leur forme - la plus adaptée à la croissance a plus de probabilité de se reproduire. Ce processus est répété jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt (par exemple une minimization de l'amélioration du résultat ou un nombre maximale de population) soit atteint [69, 70, 58].

F. Hu et Z. Zhao décrivent l'application d'un algorithme génétique global pour l'optimisation des paramètres de la stratégie de commande d'un véhicule hybride parallèle [71]. M. Montazeri-Gh et al. [70] décrivent l'application d'un algorithme génétique pour les paramètres de commande d'un véhicule hybride parallèle. Z. Chen et al. introduisent un contrôleur intelligent instantané pour économiser le carburant d'un hybride rechargeable à dérivation de puissance [58].

3.3.2.2/ PROGRAMMATION DYNAMIQUE DÉTERMINISTE

Il y a trois types de programmation dynamique déterministe (Deterministic Dynamic Programming Global OB - DDP) qui incluent les systèmes basés sur des approches multi-objectifs [72], les systèmes basés sur la théorie de Bellman [73] et la méthode de programmation dynamique classique variationnelle. L'idée principale se décompose en trois points : la discrétisation d'un processus, l'utilisation de la relation entre chaque point discret pour une optimisation individuelle et ensuite faire la somme des résultats discrets afin de former la solution globale optimale. L'approche peut être :

1. Description du problème :

La procédure de résolution peut être divisée en N niveaux et pour chaque niveau k il y a un état correspondant. Une décision déterministe contient cinq éléments : la variable d'état X , la variable de commande U , les lois de transfert d'état $f_k(x_k, u_k)$, la fonction de récompense $J_k(x_k, u_k)$, la fonction de récompense globale $V_{kN}(x_k, P_{kN})$. Les lois de transfert d'état $f_k(x_k, u_k)$ représentent la relation entre l'état $(k+1)$ et l'état k sous la variable de contrôle actuelle.

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) \quad (3.4)$$

La fonction de récompense $J_k(x_k, u_k)$, est générée quand la variable d'état x_k est transférée à l'état suivant x_{k+1} sous l'action de la variable de commande. La fonction de récompense globale $V_{kN}(x_k, P_{kN})$ est générée sur tous les N niveaux où P_{kN} est l'ensemble des variables de commande.

$$V_{kN} = \sum_{k=0}^{k=N-1} J_k \quad (3.5)$$

Dans le cadre d'une programmation dynamique déterministe pour la commande des états d'un véhicule hybride, la variable d'état \bar{X} peut être la vitesse de rotation du moteur thermique $\omega_e(k)$ et l'état de charge de la batterie $SOC(k)$. La variable de commande U peut être la position d'ouverture du papillon $\vartheta(k)$ et le rapport de vitesse engagé $g(k)$. La fonction de récompense $J_k(x_k, u_k)$ peut être la consommation de carburant de la phase k sous la variable d'état actuelle x_k et la variable de commande actuelle u_k et la fonction globale de récompense $V_{kN}(x_k, P_{kN})$ pourrait être la consommation globale pendant le cycle.

2. Contraintes : Après la description du problème, on peut ajouter des contraintes à la fonction de transfert. Par exemple, dans la commande d'un système hybride, on

peut donner les limitations du moteur thermique, les vitesses de rotation et le couple de la machine électrique, les états de charge ainsi que la puissance de charge et de décharge de la batterie.

- 3. Fonction objectif :** Dans la fonction objectif, un terme pénalisant est utilisé afin que les variables d'état restent dans un périmètre raisonnable, représenté comme :

$$L_k = f(cof, x_k) \quad (3.6)$$

où L_k est la fonction du coefficient pénalisant cof et x_k la variable d'état. Par exemple, la valeur pénalisante d'une batterie est $L_{bk} = \beta(SOC_k - SOC_{des})^2$ ou SOC_{des} est la valeur de SOC désiré.

Ainsi, la fonction objective peut être décrite comme la somme de la fonction de récompense et de la fonction pénalisant :

$$L_{objk} = J_k + L_k \quad (3.7)$$

B. Chen et al. [74] proposent une procédure systématique avec DDP pour étudier la stratégie de gestion de puissance pour des véhicules avec prolongateur d'autonomie. L. Pérez et al. [75] dérivent une division de puissance entre deux sources afin de minimiser la consommation du carburant. P. Jiankun [76] examine la réduction potentielle de consommation de carburant d'un bus hybride Plug-in et utilise les résultats afin de calibrer une stratégie de commande heuristique. S. Delprat et S. Hofman [77] utilisent DDP et PMP afin de résoudre le problème d'optimisation d'un véhicule hybride série.

L'utilisation des modèles DP est largement implémenté dans les véhicules hybrides parallèles pour déterminer le partage des couples optimaux [59, 60, 61, 62, 63, 64]. Tandis que [65, 66, 67, 68] utilisent la DP pour optimiser le partage des puissances dans des véhicules hybrides série-parallèles.

La sensibilité de la performance d'un véhicule, en fonction des rapports de transmission pour des véhicules hybrides parallèles, est analysée en utilisant une programmation dynamique basée sur l'état de charge [78]. Z. Li et al. [79] appliquent la programmation dynamique pour trouver les coûts minimaux de recharge d'un véhicule PHEV. L'approche DDP est utilisée comme indice de référence pour des architectures série afin de les comparer avec une optimisation basée sur des algorithmes génétiques [73]. Une programmation dynamique itérative est utilisée pour définir la fonction des coûts pour un cycle de conduite afin de minimiser la consommation de carburant et pour ne réaliser aucun changement d'état de charge tout en limitant le nombre d'embrayages [80]. Une approche qui remplace la programmation dynamique prédictive d'origine par un algorithme itératif rapide est présentée et comparée avec les résultats atteints avec DDP, en respectant l'effort de calcul et la qualité du résultat [81].

3.3.2.3/ PROGRAMMATION DYNAMIQUE STOCHASTIQUE

Même si une gestion DDP, basée sur des cycles de conduite enregistrés, donne de bonnes performances avec des véhicules hybrides réalistes, elle peut être ni optimale ni conserver la charge dans d'autres cycles. De plus, la solution de retour obtenu en utilisant DDP ne peut pas être implémentée directement et l'approche d'extraction des règles n'est pas linéaire. La programmation dynamique stochastique (Stochastic Dynamic Programming Global OB SDP) sert à limiter ces désavantages et nous permet, en plus, d'obtenir une stratégie de commande qui ne varie pas avec le temps (horizon infini).

C. Romaus et al. [82] utilisent DDP et SDP pour déterminer une gestion d'énergie afin de contrôler le flux de puissance vers le stockage tout au long du cycle en tenant compte des influences du trafic et du conducteur.

La DP stochastique est également implémentée en [66, 67, 83], pour être utilisée dans un véhicule réel en utilisant un nombre fini de valeurs de puissances demandées qui ont été définies en utilisant un modèle basé sur la chaîne de Markov.

3.4/ CLASSIFICATION DES APPROCHES DE GESTION D'ÉNERGIE

Après avoir étudié différentes approches de gestion du véhicule hybride, il était possible d'en proposer une nouvelle classification basée sur une étude approfondie des publications sur ce sujet, effectuée notamment durant les conférences IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference (VPPC) (Figure 3.3) comme point de départ de la thèse de Shiyu GAN (paragraphe 7.1.1.5), [47].

Afin d'être applicable dans des véhicules réels, la stratégie de gestion d'énergie doit être capable d'agir en temps réel. Le problème avec les approches scientifiques proposées jusqu'à maintenant, est le fait qu'elles ont en grande partie été simulées à l'aide de modèles où la possibilité d'agir en temps réel est moins importante. Même si les approches étaient testées en temps réel dans la modélisation, elles sont toujours loin d'être applicables en réalité, du point de vue des paramètres entrée et sortie ainsi que des problèmes de fidélité (bruit) des signaux. Le cadre scientifique ne permet pas souvent la mise en pratique dans un véhicule réel, ce qui est dommage, car il manque l'application sur le produit final.

D'un autre côté, une multitude de véhicules hybrides sont aujourd'hui commercialisés et même si on ne connaît pas forcément tous les détails sur la gestion appliquée, on peut estimer que les approches déterministes sont pour l'instant les approches utilisés majoritairement dans ces véhicules [84]. D'autres approches ont été appliquées dans des prototypes et continuent d'être développées, d'où l'importance de continuer l'étude bibliographique.

D'un côté, les approches déterministes peuvent être utilisées en temps réel et sont capables de fournir de bons résultats dans des conditions bien connues. Toutefois, leurs performances peuvent se dégrader considérablement dans des conditions situées en dehors du cas de spécification (section 4.1). D'un autre côté, il existe des approches d'optimisation globale, comme la programmation dynamique (section 3.3.2, plus précisément paragraphe 3.3.2.2 avec application en paragraphe 4.3.1), qui permettent d'obtenir une solution optimale. Cependant, ces approches nécessitent la connaissance du cycle complet et peuvent seulement être appliquées après coup et hors ligne. Pour obtenir les résultats proches de l'optimum en temps réel, il est important de proposer des approches intelligentes qui permettent d'adapter certaines valeurs de contrôle durant le cycle. Il est également pertinent de pouvoir prédire la suite du cycle grâce à une connaissance préalable (section 4.5), ou des données fournies par le logiciel de planification routière utilisé par le conducteur.

Il a été donc proposé dans Chrenko et al. [47] de ne plus classer les méthodes de gestion selon l'approche mathématique (optimisation ou pas), mais selon la possibilité de les appliquer en temps réel dans des véhicules, Tableau 3.1.

TABLE 3.1 – Classification des stratégies de gestion innovante

Real Time		Offline
Non Optimized	Adaptive	Global Optim.
Therm. On/Off	Adaptive FL	DDP
Power Follower	ECMS	SDP
Conventional FL	Robust TOB	Game Theory
	Decou. TOB	Gen. Algo.

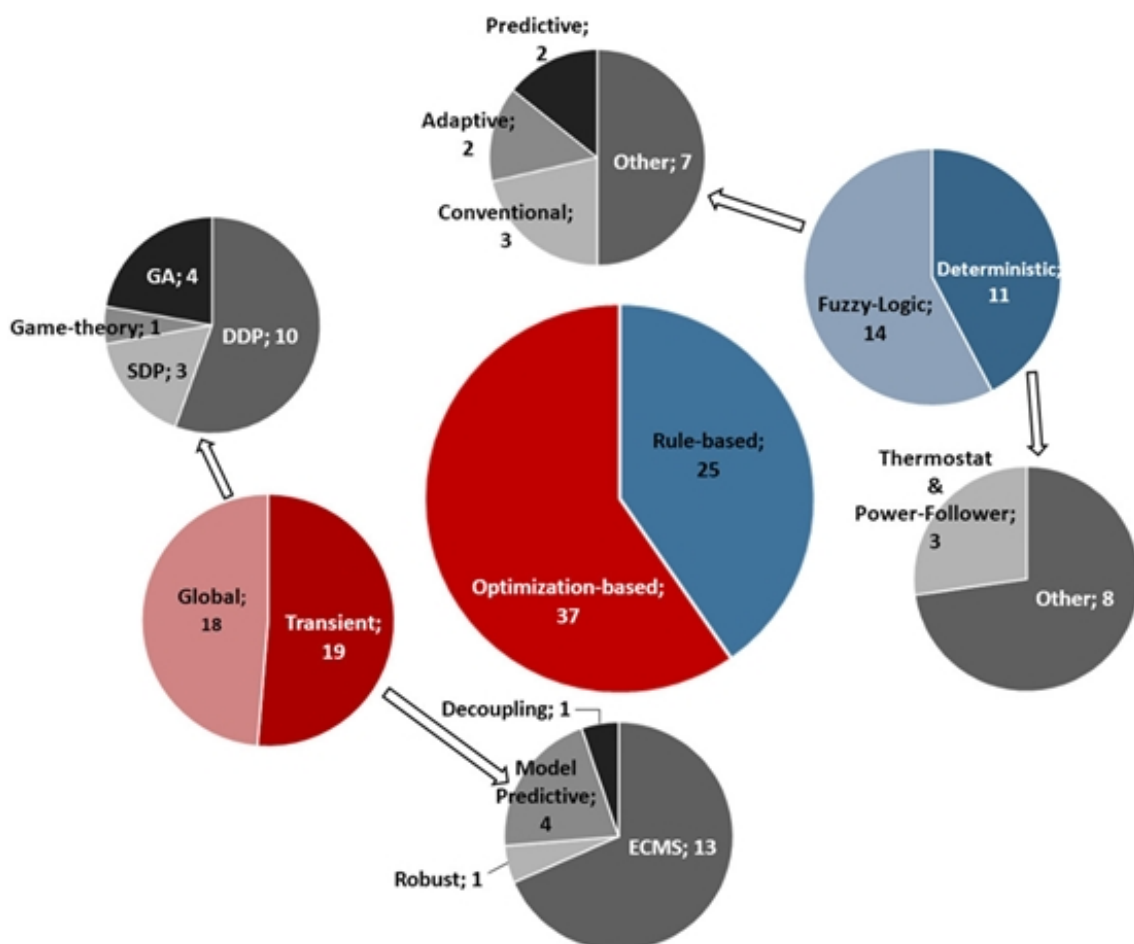


FIGURE 3.3 – Étude bibliographique sur les méthodes de gestion d'énergie

MODÉLISATION DES SYSTÈMES MULTI-PHYSIQUES

Afin d'accélérer le développement et limiter le nombre des essais à effectuer, des modèles sont développés. Les modèles sont également utilisés pour la paramétrisation de la gestion d'énergie. Les systèmes hybrides nécessitent des modèles multi-physiques et pour le développement de la gestion il faut des modèles qui sont à la fois assez précise pour montrer la variation du comportement du système suite à la modification d'un paramètre du système et assez rapide afin de pouvoir faire des modélisation sur des cycles de conduite entiers.

La section 4.1 introduira une modélisation quasi-statique préliminaire qui nous a permis de mieux comprendre les composants d'un véhicule hybride. Dans le but de concevoir un modèle dynamique la représentation énergétique macroscopique (EMR) est choisi comme moyen de structuration de la modélisation, section 4.2. La programmation dynamique est appliqué sur le véhicule NOAO en section 4.3.

4.1/ MODÈLE QUASI STATIQUE ET APPLICATION DU CONTRÔLE DÉTERMINISTE

4.1.1/ VOITURE NOAO

La voiture Noao est une voiture de compétition de type plug-in série (Figure 4.1 et Figure 4.2) équipée d'un ensemble moteur à combustion (MCI)/génératrice (E/G) défini comme prolongateur d'autonomie. Cette voiture est le résultat d'un travail collectif effectué par des experts et des spécialistes de voiture de course autour du site industriel du circuit de Magny-Cours pour la compétition sur piste [85, 86]. Il devient une référence pour les recherches en cours sur le système de VHE.

L'Association des Entreprises Pôle de la Performance de Nevers Magny-Cours (PPNMC) et Magny-Cours Circuit utilisent son expertise et son expérience pour construire la voiture présentée sur la Figure 4.2 et pour définir son algorithme de commande de façon déterministe.

L'architecture du véhicule est indiquée en Figure 4.1, la direction des flèches correspond aux flux de puissance dans le système. Le groupe motopropulseur est composé d'un moteur électrique de traction (EM), d'un convertisseur de puissance (PC), d'une batterie (B), et d'un ensemble de prolongateur d'autonomie constitué d'un moteur à combustion

interne (ICE) et d'une génératrice (G).

Les paramètres des composants du véhicule sont représentés en Tableau 4.1. Les caractéristiques de cette voiture peuvent être trouvées sur le site de l'association [85]. Le moteur électrique, une machine synchrone à aimants permanents, agit comme moteur lors de la traction et comme génératrice durant le freinage régénératif. Le moteur à combustion interne est un moteur à essence avec une cylindrée de 998 cm³.

Trois modules de batterie identiques sont utilisés comme système de stockage d'énergie réversible (ESS). Ils fournissent la plupart de l'énergie nécessaire à la propulsion et récupéreront de l'énergie lors du freinage régénératif. L'ensemble MCI/générateur (E/G) génère de l'énergie pour la partie prolongateur d'autonomie. Les deux sources d'énergie sont connectées à un bus d'alimentation électrique qui est relié au convertisseur du moteur électrique.

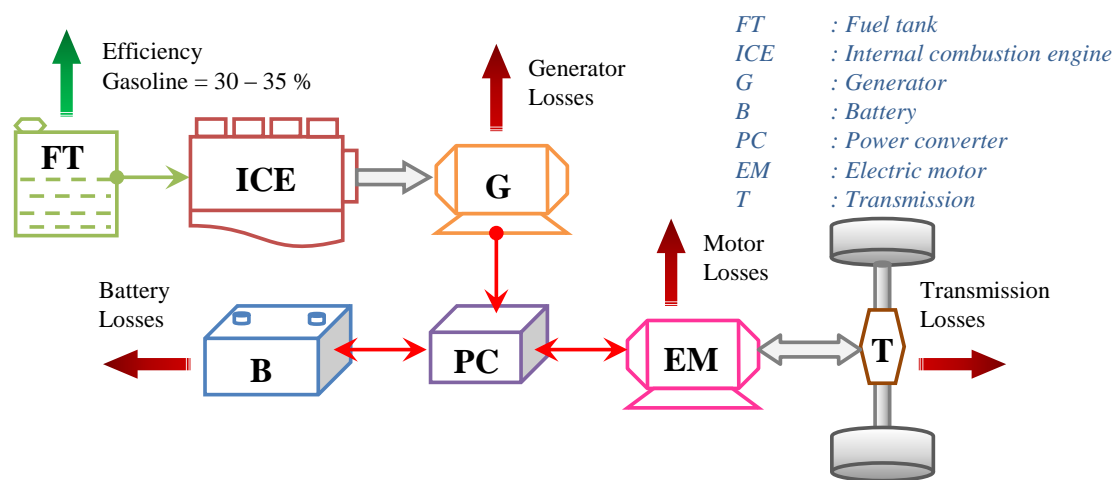


FIGURE 4.1 – Architecture de l'hybride série.

4.1.2/ STRATÉGIE DE CONTRÔLE ACTUELLE

La méthode de gestion de l'énergie utilisée dans la voiture originale est une stratégie de contrôle déterministe à base de règles, choisie en raison de sa simplicité et des bons résultats obtenus. Cette approche est largement utilisée dans des véhicules de démonstration. Pour la gestion d'énergie, on détermine les seuils de paramètres basés sur l'observation de la puissance demandée.

Pour la partie prolongateur d'autonomie, trois sous systèmes de contrôle, appliquées en utilisant DSpace, sont prévus : la commande de mode, le contrôle de séquence et le contrôle de la vitesse [87].

La commande de mode gère les aspects suivants : l'entraînement, la course, ou la feu-up (démarrage du moteur) qui détermine les conditions d'allumage du prolongateur d'autonomie. La puissance fournie par celui-ci est définie en fonction de la vitesse de la voiture, la puissance de traction, SOC (state of charge - état de charge) et quinze autres paramètres liés aux températures et aux courants.

La puissance à fournir dépend de la vitesse de rotation imposée par la génératrice et du couple qui est évalué en fonction de cinq séquences de contrôle (extinction, démarrage, rampe montante, charge et rampe descendante). De son évaluation, dépendra la masse



FIGURE 4.2 – Voiture de course NOAO.

de carburant à injecter.

Ensuite, en utilisant un régulateur PI à action directe, la commande de vitesse en fonction de la consigne sera définie.

4.1.3/ MODÈLE QUASI-STATIQUE

Un modèle quasi-statique était développé dans le contexte de la thèse de Zainab ASUS (paragraphe 7.1.1.2) et avait pour but de comprendre le fonctionnement du système global y compris la gestion d'énergie et d'obtenir les mêmes résultats que ceux recueillis durant les essais.

Le modèle quasi-statique est un modèle non causal, où les entrées et sorties n'ont pas de lien causal [88, 89]. Ce genre de modèle se compose d'un modèle statique auquel un modèle dynamique équivalent au système est ajouté [90]. Par exemple un moteur thermique se décline de la façon suivante : une carte/map statique liée à un système de premier ordre pour former le modèle.

Cette modélisation sert, en première étape, dans le cadre d'une étude sur la gestion d'énergie dans un véhicule hybride série de compétition, à déterminer les caractéristiques et les paramètres des composants des systèmes qui ne sont pas forcément connus. Ceci est réalisé en comparant les résultats des expériences et des simulations pour chaque composant. La modélisation quasi-statique peut aider à comprendre le fonctionnement global du système (en négligeant les passages en haute dynamique). De plus, elle permet de faire tourner de grands modèles complexes, car les pas de calcul sont relativement longs ce qui engendre un temps de simulation raisonnable.

Comme représenté en Figure 4.3, la puissance demandée est obtenue à partir du cycle de conduite. Cette méthode de simulation qui impose la puissance de sortie, ne permet pas de développer une commande basée sur la différence entre la valeur souhaitée et la modélisation quasi-statique. Elle ne peut donc pas être utilisée pour développer une gestion d'énergie dynamique [90]. La modélisation quasi-statique reste néanmoins un moyen utile pour comprendre des systèmes complexes. Ici, la vitesse du véhicule permet d'évaluer la puissance qui doit être fournie au moteur thermique et à la batterie.

TABLE 4.1 – Paramètres de NOAO

Masse véhicule, m_v	1200 kg
Surface frontale, A	2 m ²
Coefficient de traînée, C_x	0.35
Résistance au roulement, μ	0.012
Diamètre des roues, d_w	0.62 m
Moteur à combustion interne	3 cylindres 1.0 L, injection directe
Génératrice	54 kW at 4500 tr/min, 120 N · m
Moteur électrique	280 kW puissance maximale, 800 N · m
Batterie	3 Lithium-ion batteries, 520 V
Transmission	Simple, ratio 2.9, rendement 0.95

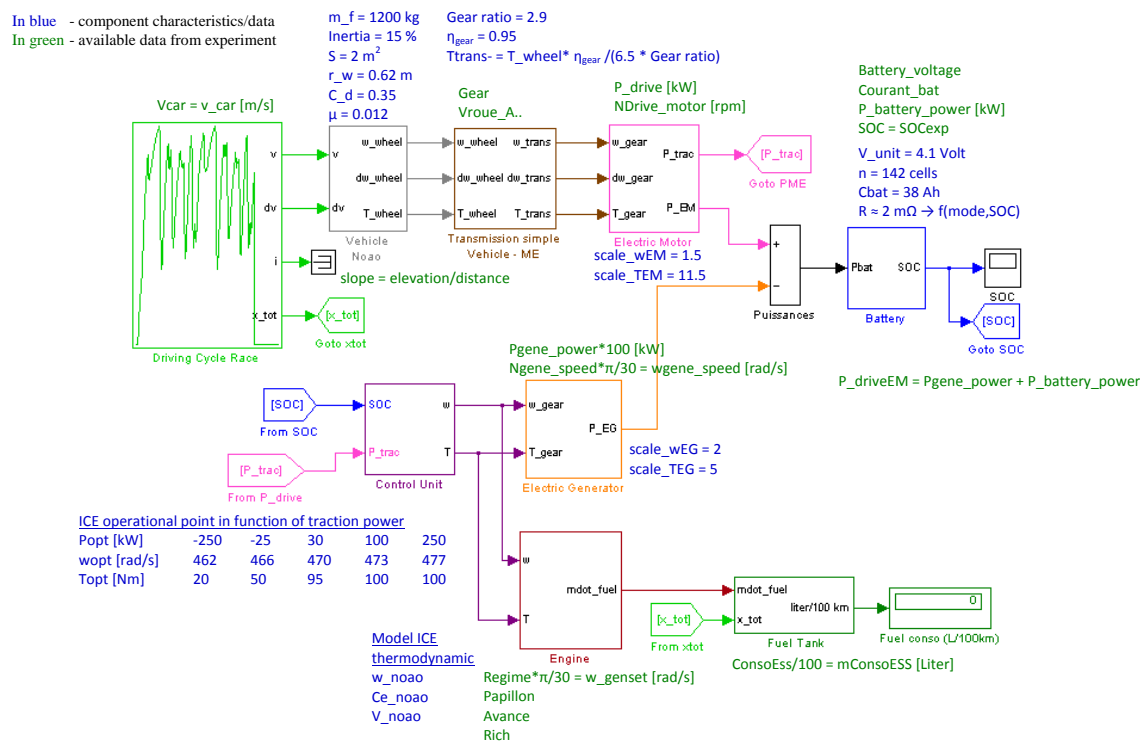


FIGURE 4.3 – Modélisation de la voiture NOAO utilisant la méthode de modélisation quasi-statique.

4.2/ DÉVELOPPEMENT DE LA STRUCTURE DE COMMANDE

Pour faciliter la modélisation dynamique, la représentation énergétique macroscopique a été choisie. La section 4.2.2 présente la REM pour l'exemple du véhicule hybride série de compétition Noao. La section 4.2.3 montre une amélioration de la gestion d'énergie pour le Noao basée sur le modèle REM.

4.2.1/ MODÈLE DYNAMIQUE

Les modèles dynamiques tiennent compte des états transitoires dans un contrôle des flux de puissance en temps réel. Une gestion de l'énergie locale doit être assurée en temps réel, il est donc essentiel de comprendre le comportement de chaque sous-système en fonction des causalités physiques. Le modèle causal demande un système de commande pour prévenir les risques de dommages et évite un fonctionnement inefficace.

Un modèle causal utilise le principe de cause à effet pour décrire le comportement du système [91]. Pour les états transitoires, on utilise une représentation intégrale des entrées par rapport au temps. Il est également possible d'ajouter des valeurs constantes. Pour simplifier la compréhension des systèmes complexes multi-physiques, il est intéressant de les représenter par des formalismes définis. Ils existent de nombreux formalismes graphiques qui peuvent être utilisés tels que Bond Graphs, Power Oriented Graphs, Power Flow Diagrams, Causal Ordering Graphs et Représentation énergétique macroscopique (REM) [92].

4.2.2/ REPRÉSENTATION ÉNERGÉTIQUE MACROSCOPIQUE (REM)

La Représentation énergétique macroscopique (REM) est une méthode pour représenter des systèmes complexes et multi-physiques en respectant la causalité pour la simulation dynamique. Ces modèles ont pour but de développer des structures de contrôle, grâce à un découpage des systèmes en sous-blocs, et de créer la chaîne de commande grâce à l'inversion de ces blocs. Cette méthodologie a déjà été utilisée avec succès pour différentes applications, comme des machines multiples [93], les systèmes de piles à combustible [94], mais aussi pour la traction électrique de véhicules [95, 96, 97, 98, 99].

En REM chaque système peut être schématisé à l'aide d'une combinaison de quelques éléments de base, Tableau. 4.2 :

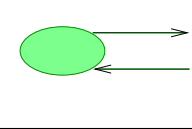
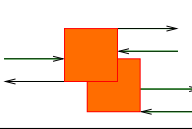
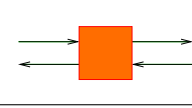
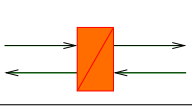
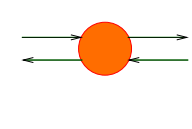
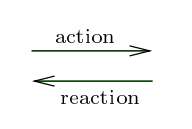
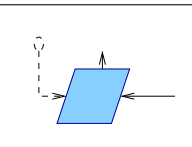
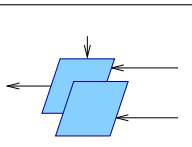
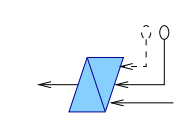
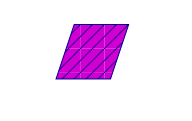
- sources et puits,
- éléments de conversion (on différencie entre conversions dans le même domaine énergétique et conversions entre différents domaines énergétiques),
- éléments de couplage,
- accumulateurs (les accumulateurs sont les seuls éléments qui varient avec le temps ; pour des raisons de causalité les variations avec le temps doivent être décrites sous la forme d'intégrale).

Les blocs sont connectés par les paramètres énergétiques, action et réaction, basée sur la causalité. Dans la plupart des cas ces liens sont au nombre de deux, courant i et tension u dans le domaine électrique par exemple.

La REM est une représentation qui aide à développer la structure d'un modèle, mais elle

n'influe pas la modélisation en elle-même. La REM permet donc le remplacement facile de la description d'une partie d'un modèle en gardant la structure globale.

TABLE 4.2 – Éléments de base du REM

	élément de source		élément de couplage
	élément de conversion (même domaine)		élément d'accumulation
	élément de conversion (différents domaines)		paire de paramètres
	Inversion de conversion		Inversion de couplage
	Inversion d'accumulation		élément d'estimation

Une fois la structure du système établie, la structure de commande peut être dérivée en suivant ces étapes :

1. Définition de la chaîne de commande (tuning path). La chaîne de commande est la connexion entre la sortie qui doit être contrôlée et l'entrée à travers des paramètres causaux.
2. Inversion éléments par élément du modèle suivant la chaîne de commande. Les composants du modèle sont inversés par les éléments présentés en tableau 4.2 :
 - Les éléments de source ne sont pas inversés.
 - Les éléments de conversion et couplage sont inversés en utilisant l'inversion mathématique. Pour l'inversion d'un élément le paramètre de couplage doit être connu.
 - Les éléments d'accumulation ne peuvent pas être inversés en gardant la causalité intégrale. Il est donc indispensable de le remplacer par un contrôleur. Le choix du contrôleur est fait par le développeur.

L'inversion de la REM amène à la **Structure de Commande Maximale (Maximum Control Structure)**. Elle est basée sur l'hypothèse que chaque grandeur est mesurable ce qui est rarement applicable. C'est pour ça qu'une **Structure de Commande Pratique (Practical Control Structure)** doit être obtenue en ignorant des valeurs non mesurables ou en les remplaçant par des estimations et en ajoutant des aspects stratégiques.

La REM du véhicule hybride série de compétition Noao est présentée en Figure 4.4. Elle comprend tous les composants du modèle ainsi que les éléments de commande. Le synoptique récente du REM de la Noao est basée sur une représentation d'un véhicule hybride série par Lhomme [99] et Martinez et al. [100], Figure 4.5. Dans le modèle, la

batterie et le convertisseur de courant sont combinés pour former une source électrique équivalente (ES_{eq}) faisant partie de la traction du système, Figure 4.4.

La représentation énergétique macroscopique aide à faciliter la conception des modèles dynamiques pour des systèmes complexes multi-physiques pour lesquels on souhaite développer le système de commande. L'approche est très modulaire car différents modèles peuvent être utilisés pour le même composant, tant que les entrées et sorties sont respectées. De plus, le même modèle de module peut être utilisé dans différentes architectures.

Pour toutes ces raisons, la REM a été identifiée assez tôt comme base de modélisation dans le projet scientifique. L'utilisation de la REM a débuté dans le contexte de la thèse de Zainab ASUS (paragraphe 7.1.1.2), qui a pu s'appuyer sur des architectures existantes et qui a développé les modèles pour différents composants (section 5.1).

La même architecture REM a pu être reprise dans le contexte de la thèse de Loïc Joud (paragraphe 7.1.1.4) qui fait ses études également sur une architecture hybride série. Les paramètres du système ainsi que certains modèles de composants ont dû être modifiés.

De plus, la REM s'est imposée comme choix évident pour la représentation et l'organisation dans le contexte de la thèse Shiyu GAN (paragraphe 7.1.1.5) qui vise des systèmes multi-architectures/multi-applications. Un nombre limité d'architecture est en cours de création utilisant les mêmes modèles de composants. L'aspect multi-application peut être intégré par une paramétrisation du modèle spécifique.

Un des grands désavantages de la modélisation REM est désormais le fait qu'elle est souvent appliquée en Simulink. Les modèles deviennent rapidement confus et lent et l'application dans des éléments de prototypage rapide demande du matériel spécifique. La traduction en code C souvent requise pour des cibles est difficilement réalisable. Dans le contexte de la thèse de Shiyu GAN il a donc été décidé de développer un modèle REM multi-application/multi-architecture basé sur l'OOP (Object Oriented Programming). Cette approche ne promet pas uniquement des temps de calculs réduits, mais également une plus grande modalité de la simulation REM ce qui facilite l'utilisation de la REM pour le prototypage rapide.

4.2.3/ COMMANDE SUR LA BASE D'INVERSION [2]

L'objectif est d'utiliser la REM afin d'élaborer une stratégie de commande pour les systèmes complexes multi-physiques à l'aide d'une inversion de modèle. La structure de commande est développée par une inversion du modèle bloc par bloc, où les blocs d'intégration et les blocs de connexion nécessitent le plus d'attention [93, 95, 96, 98, 99, 101].

En appliquant cette approche, chacun des éléments REM de la chaîne de commande est inversé pour déduire la structure de commande maximale [95, 99]. Les blocs convertisseurs, tels que la transmission, peuvent être simplement inversés, mais une entrée de critère est nécessaire pour l'inversion des dispositifs de couplage [98].

Dans l'exemple du véhicule Noao, le moteur électrique et le générateur sont tous les deux contrôlés par la commande vectorielle (aussi FOC - field oriented control) [96, 98, 102, 103] qui nécessite de mesurer la vitesse de rotation et la position actuelle du rotor en utilisant un capteur de position qui permettra également de déterminer la référence du flux. Les convertisseurs sont commandés grâce à la modulation de largeur

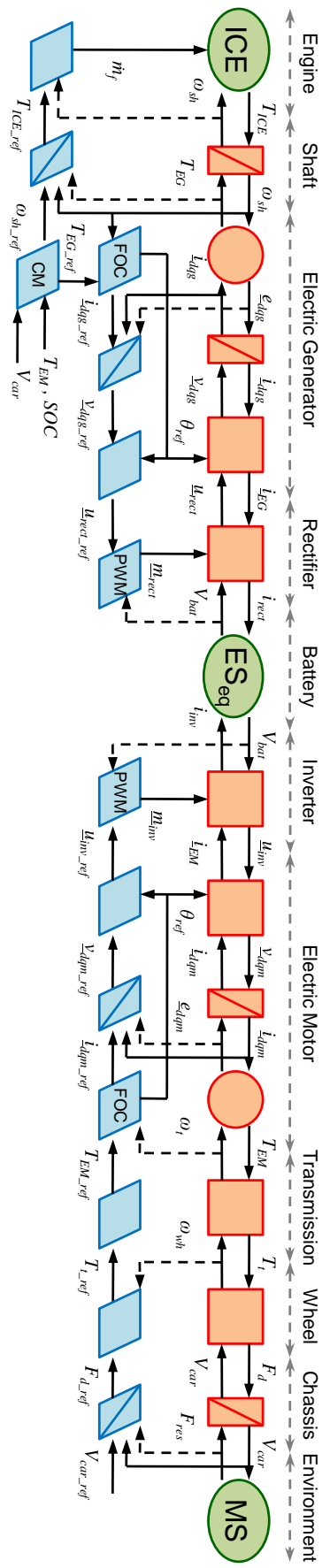


FIGURE 4.4 – Représentation énergétique macroscopique du système de voiture et de son système de contrôle à la source électrique équivalent.

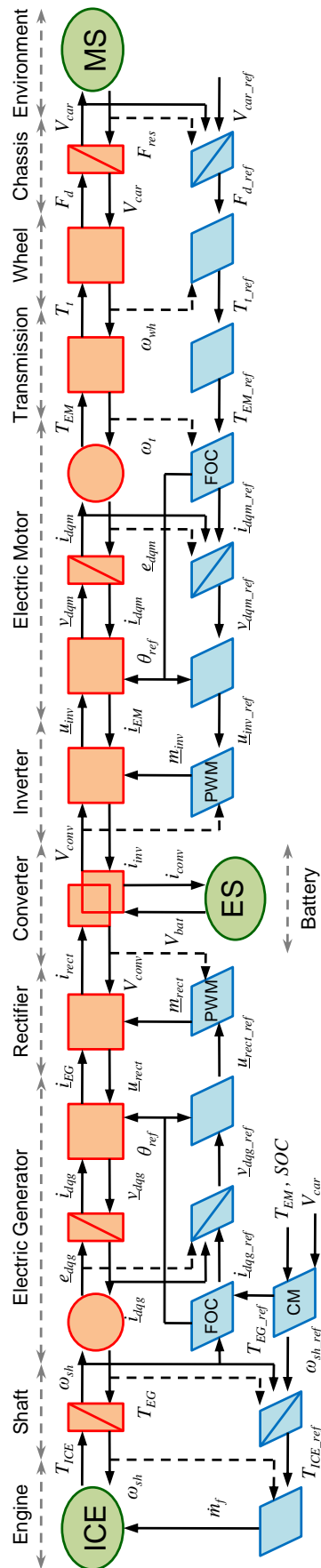


FIGURE 4.5 – Représentation énergétique macroscopique du système de voiture et de son système de contrôle.

d'impulsion (MLI ou PWM - pulse width modulation) qui nécessite de mesurer la tension batterie V_{bat} pour déterminer la fonction de modulation m .

La gestion de charge est déterminée en mesurant la vitesse du véhicule V_{car} , le couple moteur demandé T_{EM} , et l'état de charge (SOC) de la batterie comme présenté en Figure 4.4 [96, 99]. Pendant les freinages, le couple doit être partagé entre le couple de freinage régénératif et le couple de freinage mécanique.

La quantité de carburant injecté dans le moteur thermique \dot{m}_f , nécessaire pour répondre aux besoins du prolongateur d'autonomie, est déterminée en prenant en compte le couple désiré $T_{ICE.ref}$ et la vitesse de rotation de l'arbre mesurée ω_{sh} [104].

Le modèle et le système de commande représentent au mieux le système réel de Noao. Ils forment une base pour une amélioration de la commande. En premier lieu, une comparaison des résultats de simulation aux mesures expérimentales est effectuée. Pour cela, les valeurs présentées en Tableau 4.1 sont utilisées.

4.2.4/ VALIDATION DE L'APPROCHE

Pour la validation, les résultats du modèle sont comparés aux résultats expérimentaux obtenus lors des essais de roulage du véhicule sur la piste de Grand Prix Magny-Cours d'une durée de 610 s (entre 240 s et 850 s), ce qui équivaut à quatre tours de 4411 m chacun. Le cycle de conduite ainsi que les puissances et couples fournis par la machine électrique sont présentés en Figure 4.6.

Généralement, les puissances et les couples demandés par le modèle correspondent bien aux valeurs mesurées. Seul, quelques dépassements peuvent être observés, durant de fortes accélérations, au début de la course.

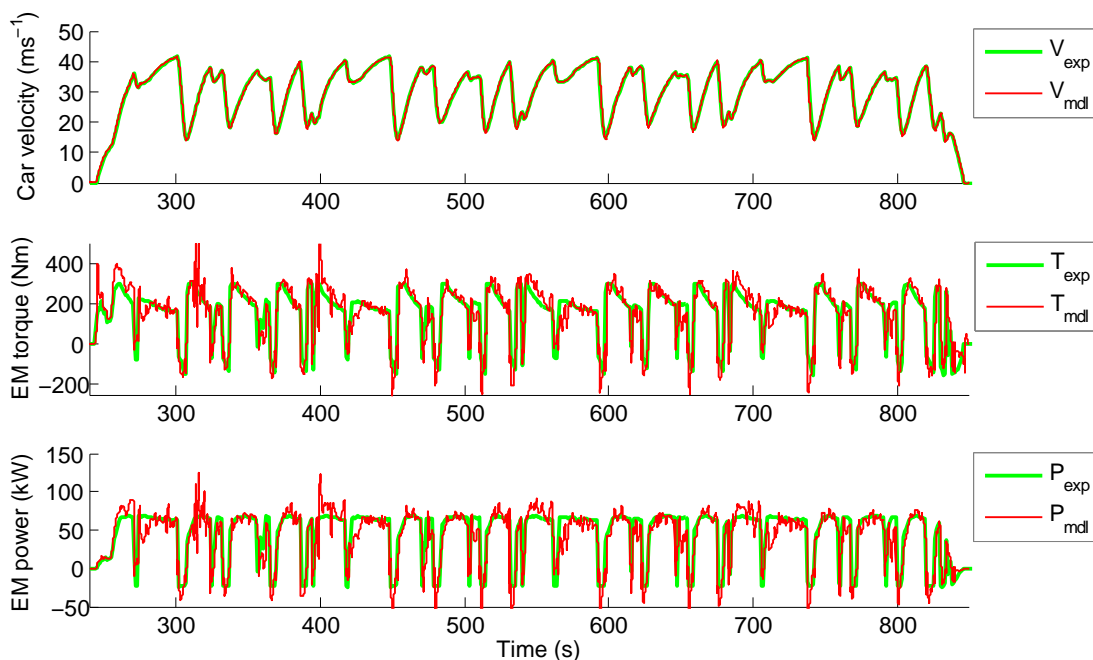


FIGURE 4.6 – Cycle de conduite et profils de puissances et du couple de la machine électrique.

Les résultats de modélisation de la batterie sont présentés en Figure 4.7, ils montrent

une bonne adéquation par rapport aux courants, tensions et SOC de la batterie. Seulement lors de fortes variations de charge, le modèle sous-estime les courants minimaux durant la récupération d'énergie, cette différence s'efface si la durée de récupération d'énergie est plus longue. De plus, on peut voir que la tension expérimentale de la batterie semble être limitée à 520 V, ceci est probablement dû à l'utilisation d'un système de gestion de batterie (BMS - battery management system) qui n'est pas encore présenté dans le modèle.

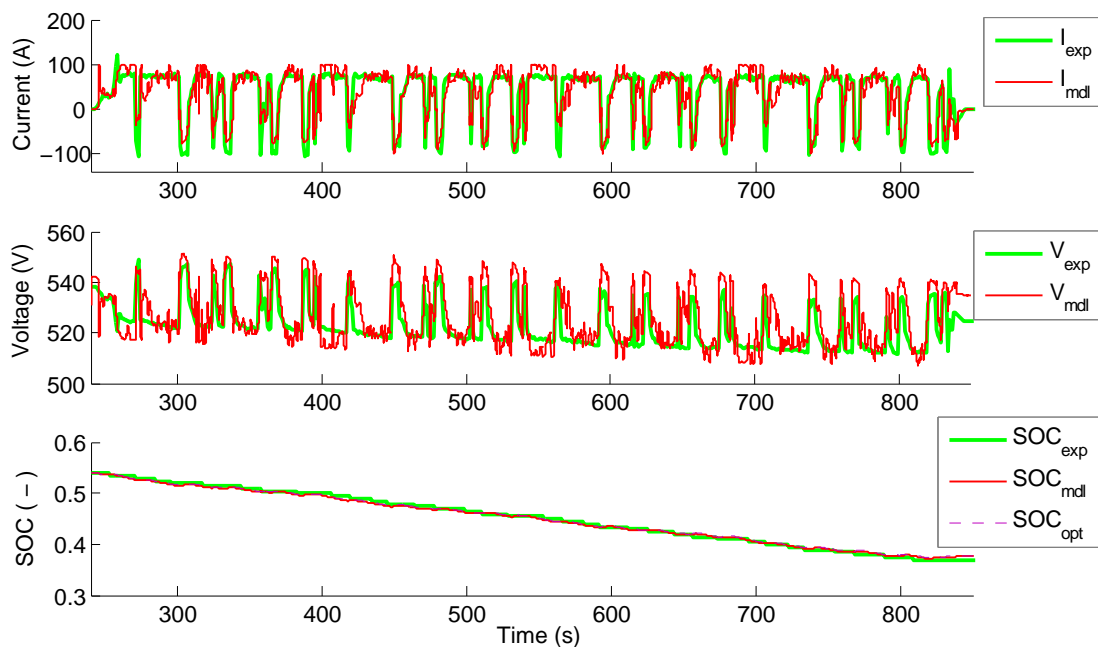


FIGURE 4.7 – Comparaison des courants, tensions et SOC de la batterie.

Le moteur thermique avec son générateur démarre peu de temps après le début de la course et reste sur un point de fonctionnement constant à une valeur de haute vitesse tout au long de la course. Le couple est également fixé à une valeur constante et haute, cette valeur est réduite durant des phases de freinage pour ne pas dépasser le courant maximal de charge acceptable de la batterie (Figure 4.8). Ce comportement est correctement représenté par le modèle et l'estimation de la consommation de carburant est satisfaisante.

Cette consommation dépend directement des points de fonctionnement du MCI qui sont présentés en Figure 4.9. On voit que les points de fonctionnement modélisés correspondent bien aux points relevés expérimentalement.

Afin d'estimer les points de fonctionnement les mieux adaptés, la consommation spécifique (BSFC - brake specific fuel consumption) et les points optimaux de fonctionnement de chaque vitesse (OOP - optimal operating points) sont évalués en combinant les performances du MCI et du générateur (Figure 4.9). On peut voir que la plupart de ces points se trouvent à une vitesse de rotation quasi constante de 470 rad/s ou 4490 tr/min, mais que le couple peut varier entre 40 N · m et 90 N · m selon le type de gestion choisi et se trouvent dans la zone de fonctionnement optimale du système moteur-générateur.

Le système moteur-générateur d'un véhicule hybride série doit travailler dans la zone du meilleur rendement combiné, par exemple en suivant la ligne des points optimaux, pour assurer une consommation minimale. Néanmoins, le choix des points de fonction-

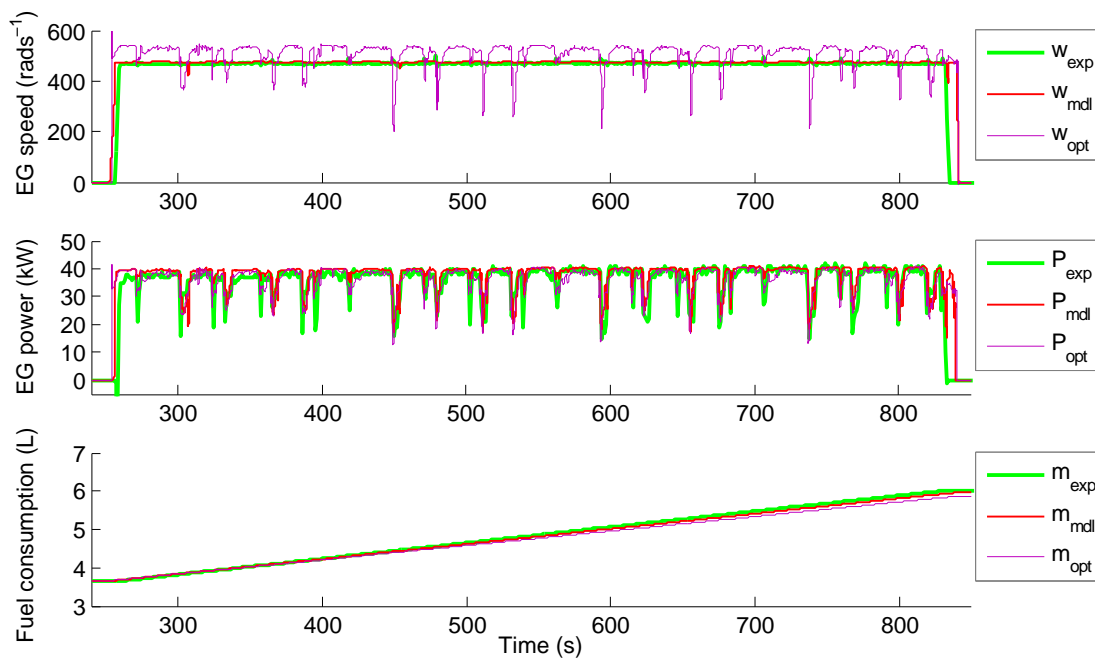


FIGURE 4.8 – Comparaison des vitesses de rotation et de la consommation de carburant du moteur thermique avec générateur.

nement est imposé par la stratégie de gestion d'énergie du véhicule. Le système moteur-générateur est allumé (ON) pendant tout le cycle de conduite, car la puissance demandée nécessite toujours le fonctionnement du moteur thermique. Ce comportement est particulier car un véhicule de compétition travaille à des puissances moyennes plus élevées qu'un véhicule classique.

Comme la gestion d'énergie heuristique est bien adaptée pour des systèmes en temps réel, une approche avec la même puissance fournie par le moteur-générateur, mais un point de fonctionnement optimisé est étudié. Les résultats sont présentés en Figure 4.7 et ils confirment que l'évolution du SOC ne change pas, car les puissances ne changent pas. La Figure 4.8 montre qu'en changeant la vitesse de rotation du moteur thermique, il est possible d'obtenir les mêmes puissances avec une consommation de carburant diminuée quand les points de fonctionnement se trouvent sur la ligne des points optimaux. La distribution des points de fonctionnement du moteur thermique, selon la ligne des points optimaux, est présentée en Figure 4.9.

Il est difficile de déduire la consommation de carburant en utilisant la Figure 4.9 car de nombreux points de fonctionnement peuvent être superposés. Il est donc intéressant d'évaluer la totalité de ces points incluant la procédure de démarrage et les états transitoires afin d'étudier la consommation totale.

La Figure 4.10 montre la répartition de la consommation de carburant pour les paramètres de commande actuels. Le point le plus utilisé se trouve entre $80 \text{ N} \cdot \text{m}$ et $90 \text{ N} \cdot \text{m}$ avec des vitesses de rotation entre 400 rad/s et 500 rad/s ce qui correspond à une consommation de carburant de $1,368 \text{ kg}$. Cette zone représente 83% de la consommation totale de $1,717 \text{ kg}$. Durant les phases de récupération d'énergie, la puissance maximale livrée par le moteur-générateur est limitée à 30 kW , les points de fonctionnement se situent entre $70 \text{ N} \cdot \text{m}$ et $80 \text{ N} \cdot \text{m}$ et les vitesses de rotation entre 400 rad/s et 500 rad/s . Les

points de fonctionnement avec couple limité représentent 13% de la consommation.

La consommation de carburant durant la phase de démarrage et des états transitoires est insignifiante comparée à la consommation globale. Une optimisation des points de fonctionnement est effectuée comme présentée en Figure 4.9. En Figure 4.11, on peut voir que la plupart des états transitoires se situent à des vitesses de rotation entre 500 rad/s et 600 rad/s avec un couple entre 70 N · m et 80 N · m. Sur le même cycle avec des points de fonctionnement améliorés, la consommation est de 1,652 kg de carburant. Cette valeur montre une diminution de consommation de 3,8% par rapport à la gestion d'énergie initiale. Les phases de récupération d'énergie représentent également 13% de la consommation de carburant. Les points de fonctionnement durant les phases de récupération se trouvent aux mêmes vitesses de rotation, mais dans une fourchette de couple réduite entre 60 N · m et 70 N · m.

L'analyse de la concentration de la consommation sur des zones de fonctionnement spécifiques du moteur thermique indique qu'une grande partie des points de fonctionnement est très regroupée. En conséquence, l'amélioration de la consommation dans ces régions aura une grande influence sur la consommation globale.

La même approche peut également être appliquée sur d'autres paramètres, par exemple les émissions, en identifiant les zones reliées aux émissions les plus importantes et en traitant ces zones en priorité.

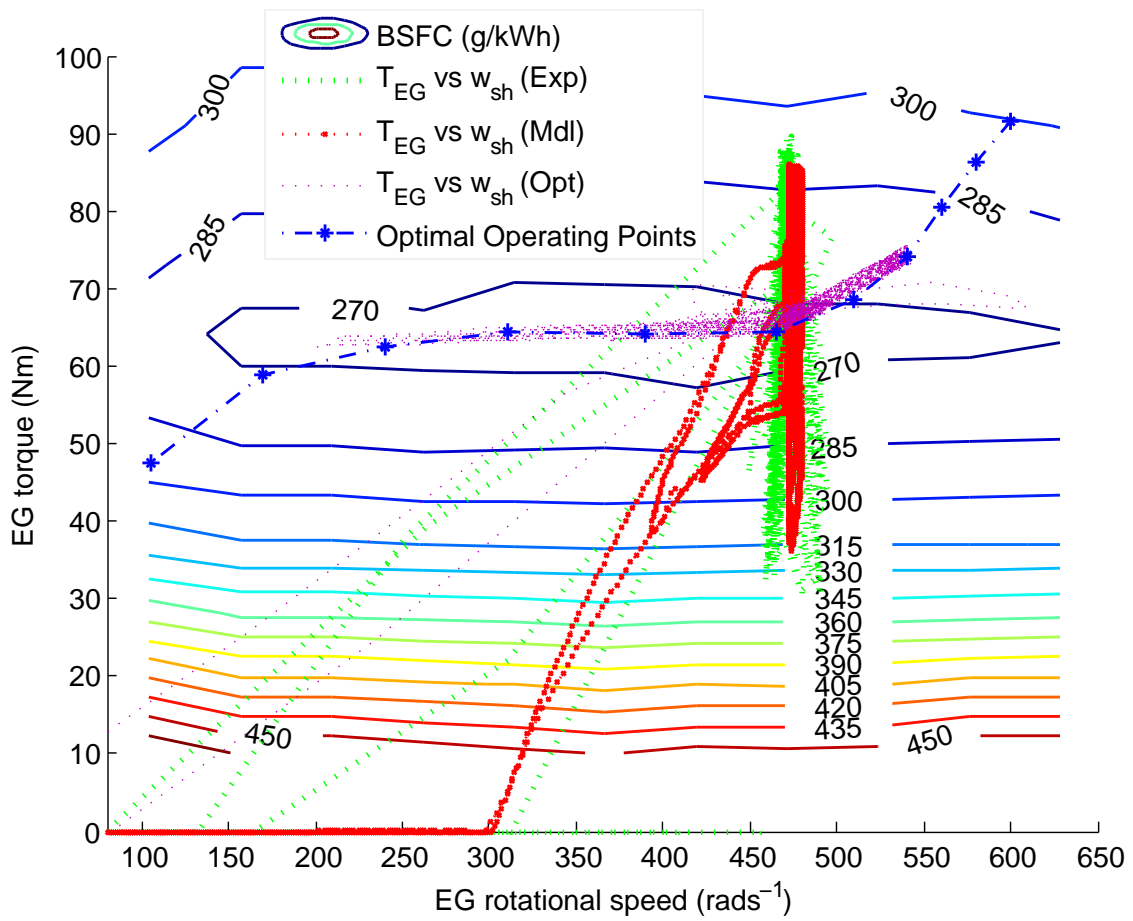


FIGURE 4.9 – Points de fonctionnement du moteur-générateur.

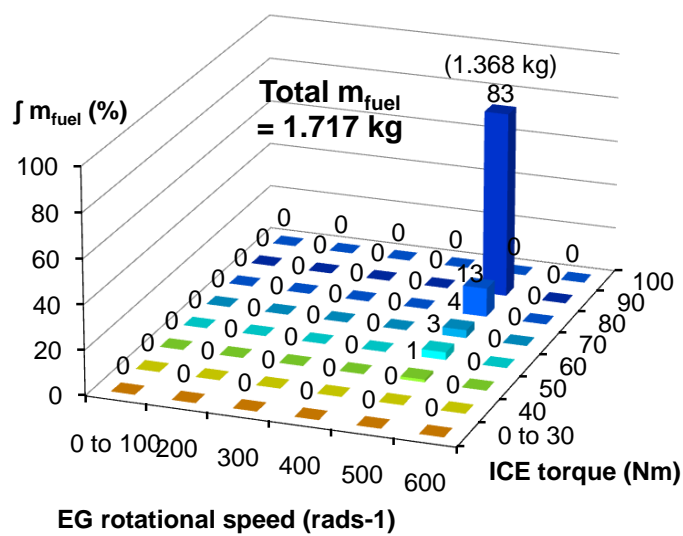


FIGURE 4.10 – Répartition de consommation en utilisant une gestion d'énergie initiale.

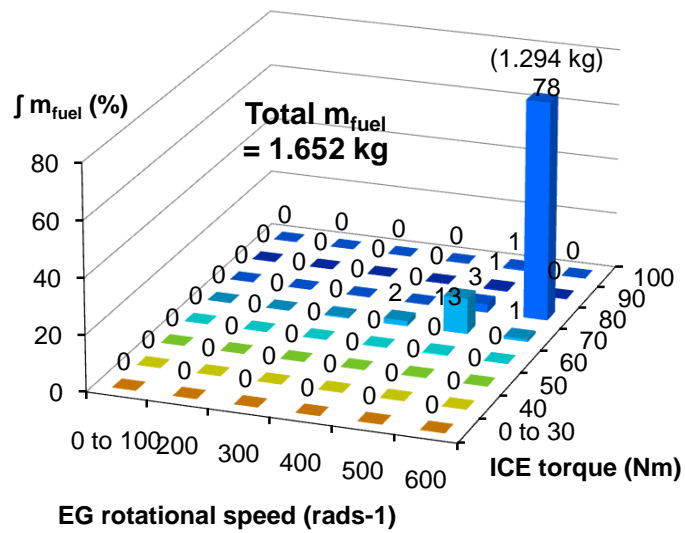


FIGURE 4.11 – Répartition de consommation en utilisant une gestion d'énergie améliorée.

4.3/ PROGRAMMATION DYNAMIQUE DE LA NOAO

La programmation dynamique (DP - Dynamic Programming, section 3.3.2.2) est capable d'évaluer la commande optimale pour des systèmes non-linéaires, contraints, qui varient avec le temps à l'aide d'une approximation discrète du temps, sur la base d'un modèle dynamique d'un véhicule hybride. Grâce à la DP, il est possible d'évaluer la consommation de carburant optimale absolue pour différentes configurations, mais la DP nécessite la connaissance de tous les états futurs des entrées [18, 105, 106].

Cette approche n'est donc pas applicable dans le véhicule en temps réel à cause de la nécessité de connaissance du cycle complet et la demande de calculs lourds. Néanmoins, la DP peut être utilisée lors de simulations hors ligne (offline) pour comparer les performances d'une gestion en temps réel avec la solution optimale [59, 60, 61, 107].

4.3.1/ DP FORMULATION DU PROBLÈME

La programmation dynamique utilisée dans des véhicules est basée sur la formulation du problème pour véhicules hybrides série présentée par Koot et al. [108], Brahma et al. [93], et Perez et al. [109]. La puissance demandée à l'instant t est la somme de deux sources de puissance (Equ. 4.1), la puissance livrée par le moteur-générateur P_{EG} et la puissance de l'élément de stockage d'énergie (ESS - Energy Storage System souvent des batteries) P_{ESS} . La puissance ESS est positive quand une énergie est fournie et négative quand une énergie est reçue. La puissance demandée P_{req} est définie comme la puissance requise du moteur électrique de traction.

$$P_{EG}(t) + P_{ESS}(t) = P_{req}(t) \quad (4.1)$$

Les sources de puissance sont limitées par des contraintes physiques présentées en (Equ. 4.2) et (Equ. 4.3).

$$0 \leq P_{EG} \leq P_{EG_{max}} \quad \forall t \in [0, T] \quad (4.2)$$

$$P_{ESS_{min}} \leq P_{req} - P_{EG} \leq P_{ESS_{max}} \quad \forall t \in [0, T] \quad (4.3)$$

Le but de la commande est de minimiser la consommation d'énergie du système pendant l'intervalle $[0, T]$. Il faut identifier le profil des puissances dans le moteur générateur et les éléments de stockage d'énergie qui minimise la fonction des coûts (Equ. 4.4) ou P_{fuel} représente la quantité de carburant brûlée.

$$\begin{aligned} COST = & \int_0^T \frac{P_{fuel}(t)}{P_{EG}(t)} dt \dots \\ & + \int_0^T \frac{P_{bat}(t)}{P_{ESS}(t)} dt \text{ si } P_{ESS}(t) \geq 0 \\ & + \int_0^T \frac{P_{ESS}(t)}{P_{bat}(t)} dt \text{ si } P_{ESS}(t) < 0 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Le modèle de programmation dynamique est implémenté dans une fonction Matlab développée par Sundstrom et Guzzella [110] et modifiée pour améliorer le facteur de partage des puissances u_k appliqué sur le système.

4.3.2/ AMÉLIORATION DU SYSTÈME ACTUEL

4.3.2.1/ APPLICATION DP SUR VÉHICULE EN ÉTAT

La Noao utilise actuellement une gestion heuristique afin de définir la répartition de puissance entre la batterie et le moteur-générateur. Les objectifs étant d'aider la batterie lors des phases d'accélération et de récupérer de l'énergie dans la batterie lors des phases de freinage, comme indiqué en Figure 4.12. Pendant la phase observée, le SOC est passé de 54% à 37% sur une durée de 610s ce qui équivaut quatre tours de circuit. La commande choisit des points de fonctionnement du moteur-générateur dans la région du meilleur rendement.

Une optimisation des points de fonctionnement, en utilisant la programmation dynamique, est effectuée sur le même cycle de conduite pour analyser les améliorations de rendement énergétique envisageables. Elles peuvent se faire durant des phases de roue libre notamment en utilisant le moteur-générateur pour recharger les batteries. Les valeurs sont comparées en Tableau 4.3.

4.3.2.2/ AMÉLIORATION DE L'AUTONOMIE

Comme présenté auparavant, il est prévu que la charge de batterie atteigne un seuil minimal au bout du nombre de tours défini pour le véhicule. Avec la gestion initiale, le véhicule peut effectuer 14 tours sur le circuit avec un SOC décroissant de 90% à 30% et sous l'hypothèse d'une diminution linéaire.

L'autonomie de la voiture dépend de la distance qu'elle aura couverte avant que le SOC tombe en dessous de 30%. En gardant l'hypothèse que sa décharge reste linéaire et en recourant à une optimisation par programmation dynamique, on souhaite étudier la possibilité d'augmenter l'autonomie du véhicule pour qu'il puisse atteindre 20 tours. En utilisant les mêmes conditions que dans l'étude expérimentale, il faut arriver à un SOC de 42% à la fin des 14 tours.

	Actual Method	RB	DP	DP Endu- rance
SOC Initial			0.54	
SOC Final	0.37		0.37	0.42
$\sum P_{req}$ [MWs]			32.448	
$\sum P_{EG}$ [MWs]	20.894		20.513	22.790
$\sum P_{fuel}$ [MWs]	84.194		76.099	84.166
Average η_{EG}	0.2482		0.2696	0.2708
$\sum m_{fuel}$ [kg]	1.914		1.729	1.913
$\sum P_{ESS}$ [MWs]	11.554		11.935	9.6577
$\sum P_{bat}$ [MWs]	11.599		11.769	9.6439
Average η_{ESS}	0.9961		1.0141	1.0014
Average η_{system}	0.3387		0.3693	0.3459

TABLE 4.3 – Améliorations d'autonomie grâce à la DP

4.3.2.3/ AMÉLIORATION DE LA PERFORMANCE

Une approche comparable est utilisée pour améliorer les performances de ce véhicule dans le cadre d'une conduite plus agressive. Ce genre de conduite sur le même circuit va entraîner une augmentation du besoin énergétique pendant le tour. Ceci mène à une décharge de batterie plus rapide entre autre à cause des pertes. Néanmoins, le véhicule peut effectuer le tour plus rapidement, but essentiel lors d'une course automobile.

Pour cette étude, les données expérimentales ont été modifiées, notamment les limites des puissances pour les sources de puissance ont été accrues. Ceci mène à une augmentation de la vitesse comparée à la configuration initiale car le surplus de puissance renforce l'accélération comme présentée en Figure 4.13.

Dans cette simulation, le SOC décroît de 38% à 9% en 580 s en seulement quatre tours de circuit. Ceci équivaut à huit tours de circuit pour passer de 90% à 30%. Après analyse, on se propose d'abaisser le SOC minimum pour essayer d'obtenir une meilleure autonomie. Les résultats sont présentés en Tableau 4.4.

	Actual Method	RB	DP Optimized	DP Maximum
SOC Initial			0.38	
SOC Final	0.09		0.09	0.14
$\sum P_{req}$ [MWs]			38.342	
$\sum P_{EG}$ [MWs]	19.276		17.829	21.498
$\sum P_{fuel}$ [MWs]	72.600		66.483	79.377
Average η_{EG}	0.2655		0.2682	0.2708
$\sum m_{fuel}$ [kg]	1.650		1.511	1.804
$\sum P_{ESS}$ [MWs]	19.136		20.514	16.845
$\sum P_{bat}$ [MWs]	19.063		19.354	16.073
Average η_{ESS}	0.9962		1.0600	1.0480
Average η_{system}	0.4138		0.4467	0.4017

TABLE 4.4 – Améliorations des performances grâce à la DP

4.4/ PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Dans la partie précédente, trois études ont été effectuées avec l'objectif d'optimiser la performance d'un véhicule hybride série par rapport à différents aspects. Il peut être observé que l'optimisation avec la programmation dynamique permet au véhicule, dans différentes configurations, de diminuer la consommation de carburant et d'augmenter le rendement par rapport à la gestion d'énergie heuristique actuellement appliquée.

Les améliorations du système actuel mènent aux résultats présentés en Figure 4.12. Pour arriver au même SOC final, l'optimisation DP choisit des puissances plus élevées du moteur-générateur en début de trajet, puis de diminuer sa consommation pour favoriser l'utilisation de l'énergie de la batterie en fin de trajet. Le Tableau 4.3 montre que l'optimisation permet aussi de diminuer la consommation, d'améliorer le rendement du carburant et du système et le rendement de l'énergie récupérée durant les phases de freinage.

Le deuxième cas étudié vise à allonger l'autonomie du véhicule. Les résultats des deux profils de puissances sont présentés en Figure 4.14 et en Tableau 4.4. On peut voir que le moteur-générateur fournit plus de puissance pour compléter l'énergie délivrée par la batterie. Certaines fois, durant les accélérations, il en produit plus que nécessaire pour la propulsion, afin d'améliorer la recharge de la batterie.

La Figure 4.15 présente la distribution des points de puissance du moteur-générateur en fonction de la puissance demandée par la gestion d'énergie actuelle, l'optimisation DP et l'optimisation DP pour une autonomie augmentée. Avec la gestion actuelle, les points de fonctionnement pour le moteur-générateur sont dispersés et leurs valeurs limitées surtout en phase de freinage. Avec la DP, ils sont ordonnés et atteignent 40 kW lors des phases de freinage et d'accélération. La puissance fournie par le moteur-générateur dans la gestion actuelle est majoritairement nulle quand la puissance nécessaire pour la traction est entre -20 kW et 20 kW alors qu'en DP une variation linéaire est appliquée.

En Figure 4.15, il n'est pas facile de distinguer entre la gestion DP et DP pour une autonomie augmentée, mais les différences sont clairement visibles en Figure 4.12 et Figure 4.14. Il est souhaitable que les résultats obtenus durant cette étude, puissent être appliqués dans le véhicule réel afin d'étudier leur impact.

Comme présenté en Tableau 4.4, et conformément aux attentes, les demandes de puissance ont augmenté dues à la conduite plus agressive que dans le cas de référence. Le véhicule est capable de terminer son tour 7,5 s plus tôt mais la charge de batterie diminue plus rapidement et implique des pertes d'énergie importantes dans la chaîne de traction. Dans le véhicule réel, il est préférable d'utiliser en priorité l'énergie de la batterie pour améliorer la performance.

En utilisant la DP, le rendement global du système est augmenté. La consommation de carburant diminue car la gestion choisit de limiter la puissance fournie par le moteur-générateur comme présenté en Figure 4.16 afin de permettre à la batterie de fournir légèrement plus de puissance pour la propulsion, tout en gardant la même diminution de SOC par tour.

Afin de déterminer le nombre maximal de tours qui peut être effectué avec le véhicule dans cette configuration, la gestion fixant un SOC final de 14% (comme présenté en Figure 4.17) diminue l'autonomie du véhicule mais améliore son temps par tour. Ceci correspond uniquement à une autonomie de 10 tours de circuit même si le moteur-générateur fournit la puissance maximale afin de recharger la batterie pendant les phases de freinage régénérative.

Pour l'instant, même si la méthode n'est pas applicable dans un véhicule réel, cette approche sert de référence pour identifier les paramètres des sources de puissance afin d'accroître la performance du véhicule.

Les simulations pour cette étude sont effectuées sur un Intel(R) Pentium Dual CPU 1.8 GHz avec 2 GB RAM. Le temps de calcul varie entre 53 s et 65 s pour analyser 20 millions de points, ce qui veut dire potentiellement 3.3 millions de points de calcul par seconde pour résoudre ce genre de problèmes.

Prochainement, il sera possible d'implémenter des méthodes similaires basées sur les résultats présentés ici. Les deux verrous pour l'implémentation de la DP sont la connaissance du cycle complet et la possibilité de la faire tourner en temps réel. Ce dernier point est réalisable en ayant une gestion et un ordinateur suffisamment performant. Le cycle complet lui varie peu dans le cas d'un véhicule de course, il peut être possible d'utiliser la connaissance du cycle pour prédire la suite. Comme le circuit peut être découpé en

tronçons, le problème d'optimisation est réduit ainsi que l'effort de calcul. La variation du SOC peut être prédi en utilisant une optimisation déconnectée pour la durée de la course, et en parallèle, une vérification et une actualisation de son état à chaque tour est souhaitable.

L'étude de faisabilité de l'optimisation en utilisant la programmation dynamique en fonction du nombre de tours est présentée en Figure 4.18. Elle considère un SOC initial de 90% et change la valeur du SOC final selon le nombre de tours à effectuer pour une utilisation optimale. Les courbes montrent qu'une conduite normale (cas de référence) est possible pour une durée de course de 6 à 18 tours. Dans le cas d'une conduite agressive l'autonomie diminue et arrive à une autonomie entre 5 et 10 tours. En dessous de cette distance, le système a intérêt de fonctionner uniquement en mode électrique pour augmenter le rendement total. La décharge de batterie prévue n'étant pas faisable pour des distances plus élevées, il faudra changer les consignes.

En optimisant l'hybridation, le rendement du système diminue quand la distance totale (le nombre de tours) augmente et la consommation de carburant augmente en fonction de la distance. La conclusion est qu'une augmentation de puissance dans la propulsion pour terminer les tours en provenance du moteur-générateur entraîne une diminution du rendement global du système.

4.5/ ÉVOLUTION DE GESTION PAR OPTIMISATION

La gestion optimale de l'énergie dans les véhicules hybrides est un sujet de recherche de haute actualité. Une puissance de calcul augmentée rendrait différentes approches capables de s'effectuer en temps réel, il reste néanmoins indispensable de connaître les états futurs des cycles. Pour ceci, il y a différents moyens de prédire les états futurs du cycle. La thèse de Zainab ASUS (paragraphe 7.1.1.2) se positionne dans le contexte spécifique des véhicules de compétition. Pour un véhicule de compétition sur piste, il est possible de prédire les vitesses détaillées par tour avec un bon degré de certitude. Dès qu'on connaît le cycle avec précision, une DP peut être appliquée, afin d'intégrer des imprévus une gestion en utilisant la commande prédictive basée sur modèle est envisageable (paragraphe 3.3.1.2). Cet aspect est traité dans le contexte de la thèse de Loïc JOUD (paragraphe 7.1.1.4).

Pour des véhicules individuels, la destination et donc le cycle de conduite approximatif sont connus, dès que le conducteur se sert de son système de navigation [37]. Un travail d'identification des cycles habituels est également en cours dans le contexte de la thèse de Loïc JOUD (paragraphe 7.1.1.4).

Il faut toutefois considérer, qu'une bonne optimisation s'étale sur un cycle de conduite complet. Ceci est particulièrement important, dans le cas d'un véhicule plug-in où il est intéressant d'arriver à destination avec une batterie vide en vue d'une recharge par secteur. Pour cela, il est nécessaire de connaître le cycle en avance. Comme cela n'est pas toujours possible, un aspect scientifique intéressant est d'évaluer la sensibilité de la régulation entre un cycle prévu et un réel [thèse JOUD, paragraphe 7.1.1.4] et aussi de développer des approches d'adaptation de la gestion d'énergie suivant les changements de conditions qui peuvent arriver durant le cycle (conditions du trafic ou conditions météorologiques).

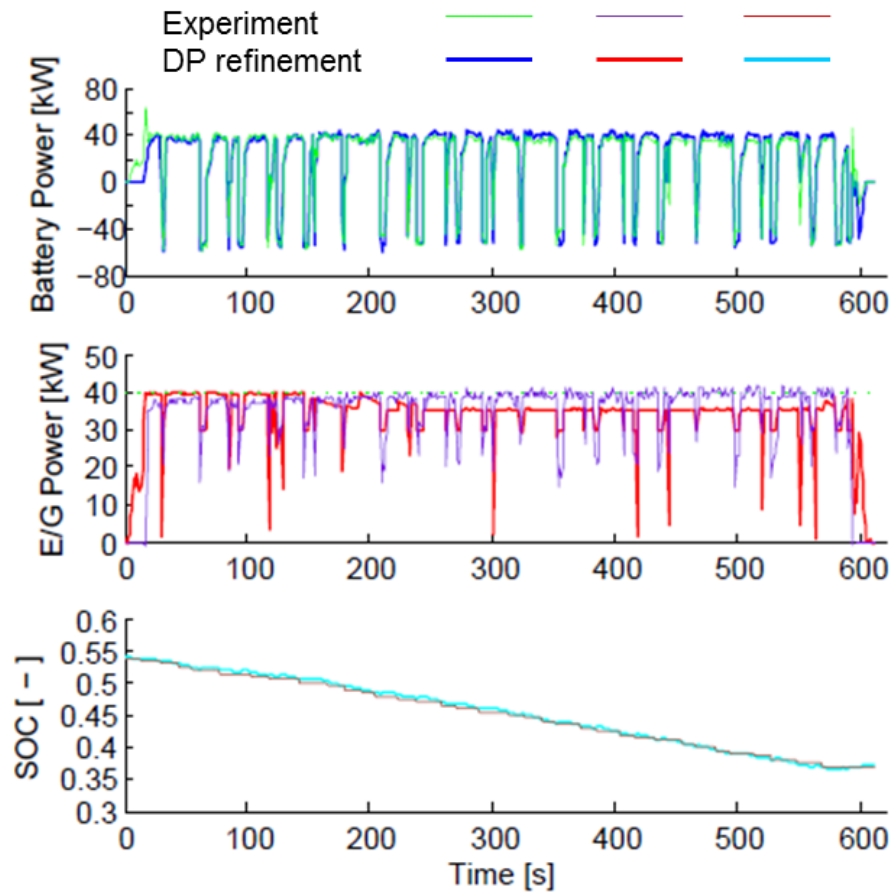


FIGURE 4.12 – Résultats de comparaison entre gestion actuelle et optimisation DP.

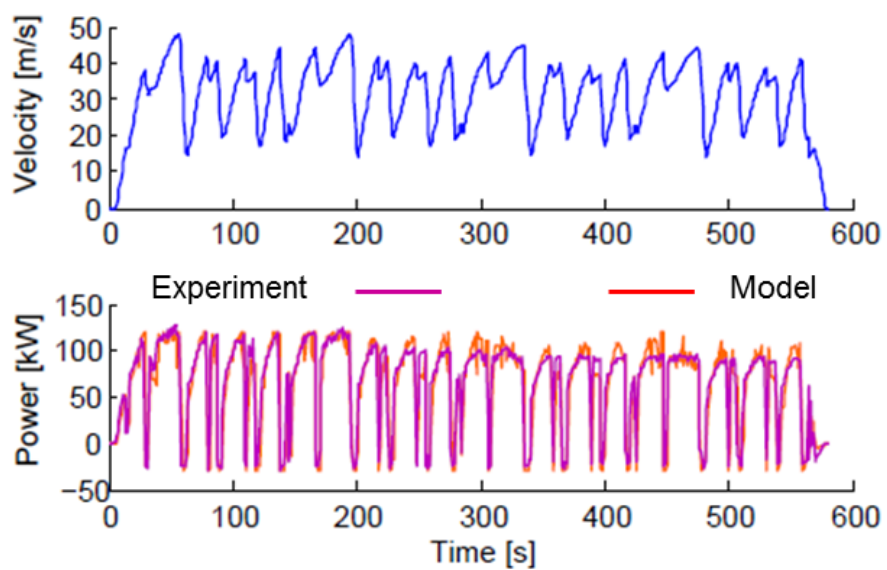


FIGURE 4.13 – Cycle de conduite agressive et son profil de puissances.

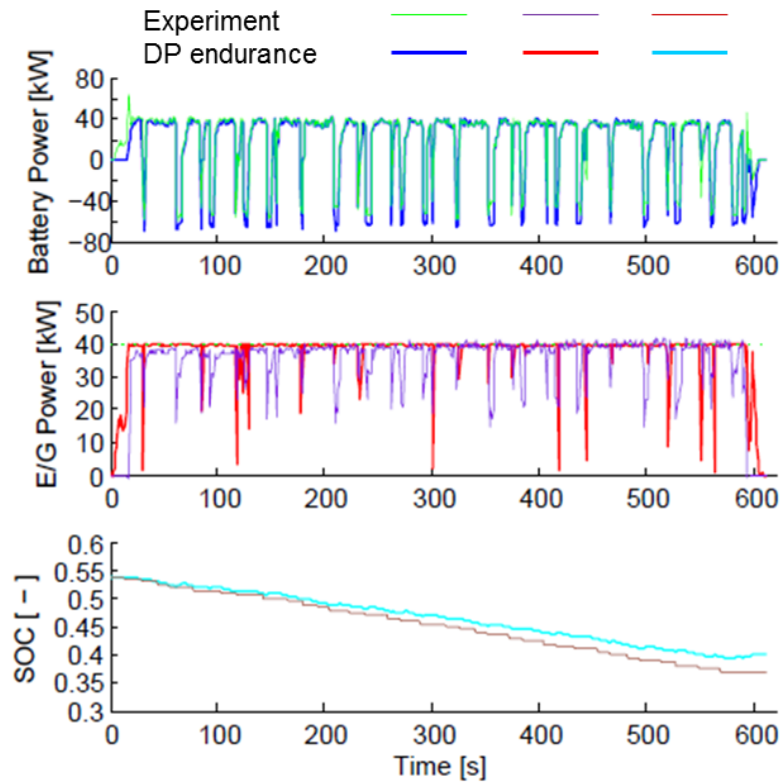


FIGURE 4.14 – Résultats de l'optimisation DP pour augmenter l'autonomie.

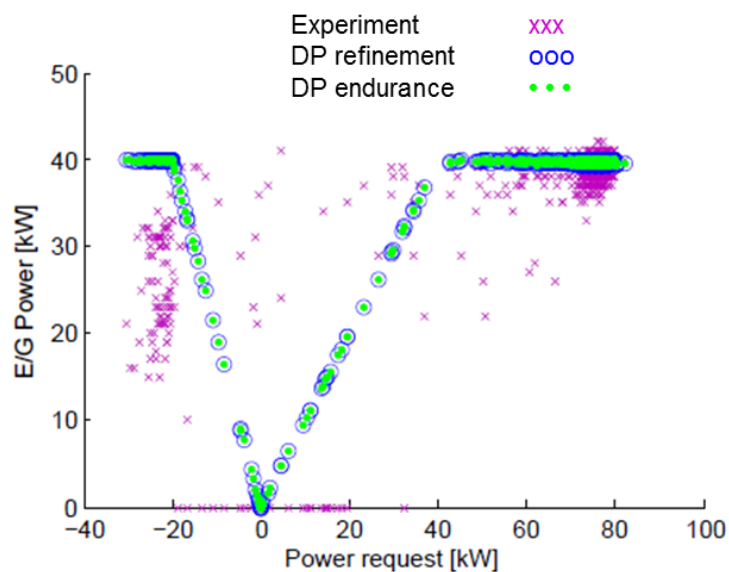


FIGURE 4.15 – Puissance moteur-générateur en fonction de la puissance de traction (croix magenta = commande initiale, cercles bleus = DP, points verts = DP pour autonomie augmentée).

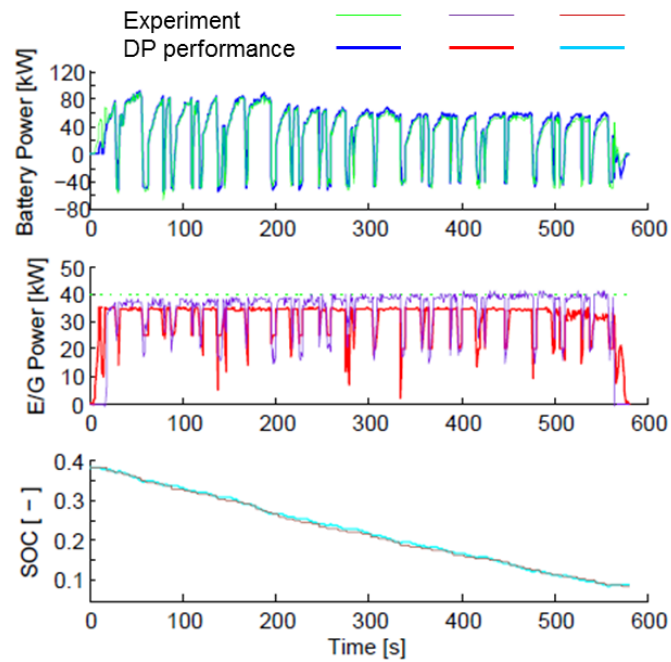


FIGURE 4.16 – Résultats de l'optimisation DP pour un cycle de conduite plus agressif.

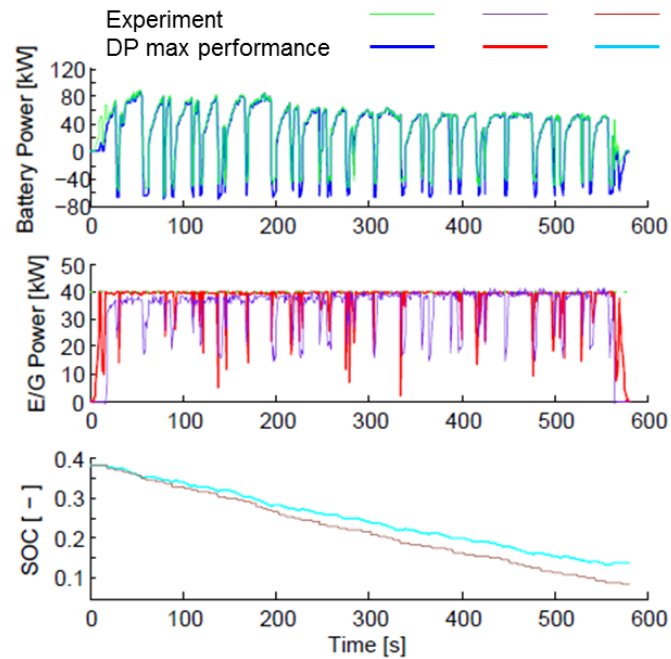


FIGURE 4.17 – Diminution maximale en utilisant un cycle de conduite plus agressif.

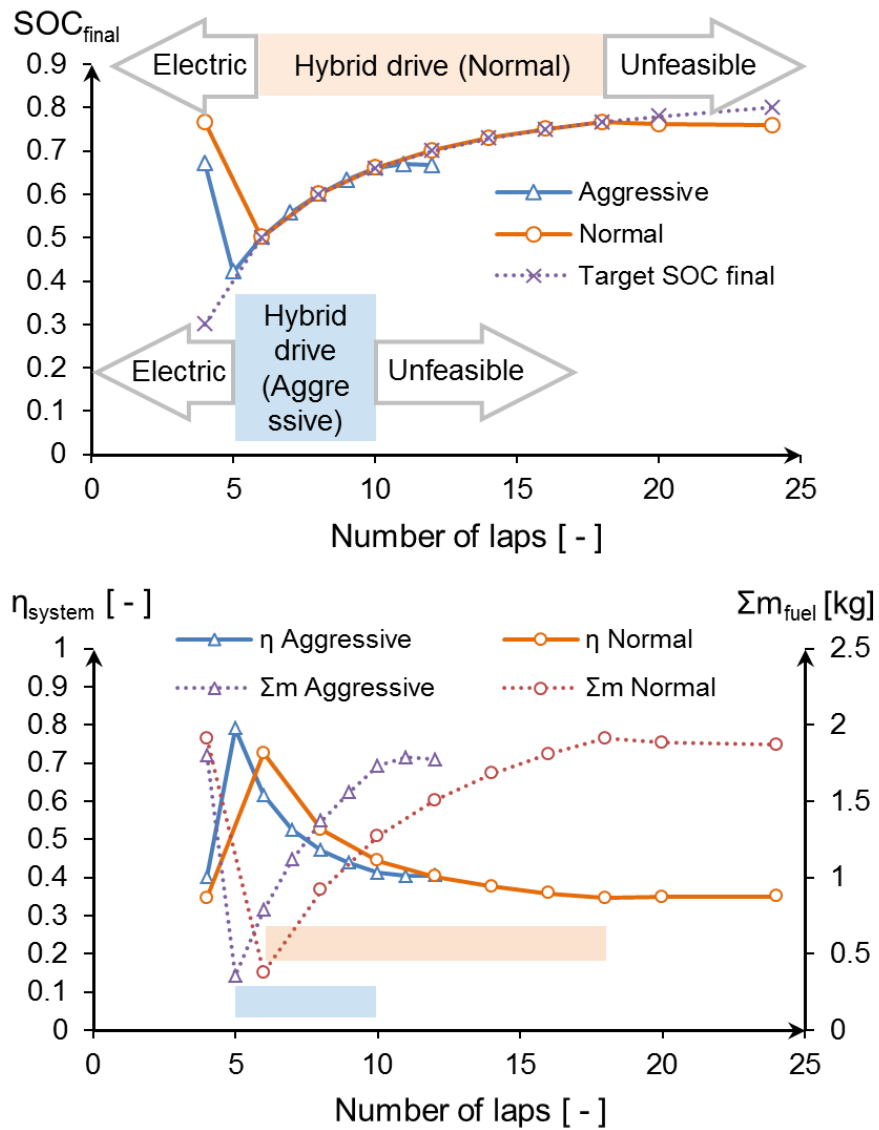


FIGURE 4.18 – Potentielle de l'optimisation DP en fonction de nombre de tours et étude en fonction du rendement du système et consommation de carburant.

4.6/ MODÉLISATION MULTI-ARCHITECTURE/MULTI-APPLICATION

Les solutions hybrides sont parmi les solutions les plus prometteuses pour un grand nombre d'applications de mobilité. Il y a donc des travaux sur les applications hybrides pour toutes sortes de véhicules, du deux roues (vélo avec assistance électrique [111] ou moto hybride[112]) aux voitures de toutes les tailles et applications jusqu'aux bus [113] en passant par des véhicules de chantier [50].

Il existe désormais différents types d'architecture, notamment les hybrides série, les hybrides parallèle et les hybrides série/parallèle introduits en section 1.2.1.2. Il est intéressant de constater que les différentes architectures coexistent dans différents types de véhicules : il y a des deux roues hybrides série [114, 115] ainsi que des deux roues hybrides parallèle [116], mais également des bus hybrides série [117, 118], des bus hybrides parallèle [113, 118, 119, 120, 121] et des bus hybrides série-parallèles [76] et qu'un grand nombre d'architectures existe pour tous les véhicules [122, 123, 124].

Le développement d'une approche multi-architecture/multi-application est donc judicieux pour plusieurs raisons. Premièrement, il y a la question du dimensionnement du système. Deuxièmement, il y a la nécessité de pouvoir lui proposer une solution de gestion d'énergie adaptée. Cette solution peut être soit une solution déterministe robuste, soit une optimisation en temps réel. Pour le développement de la gestion d'énergie, il est nécessaire de disposer de modèles qui peuvent être adaptés pour les différents applications et architectures. Idéalement, ces modèles doivent être capables d'être exécutés en temps réel afin d'être utilisables pour des approches de prototypage rapide. Celui-ci décrit la possibilité de développer des systèmes d'acquisition et de gestion basés sur des modèles afin de pouvoir les mettre en œuvre rapidement tout en laissant la possibilité de le faire évoluer par étape au fur et à mesure du développement. Une solution multi-architecture/multi-application doit donc être à la fois modulaire et simple et doit contenir une description robuste de toutes les grandeurs importantes pour la gestion. De plus, elle doit permettre de développer la structure de commande et idéalement elle doit être capable d'appliquer différentes approches de gestion d'énergie.

L'autre aspect qui rend les approches multi-architecture/multi-application intéressantes est la question du dimensionnement des composants d'un système hybride. Il existe notamment un lien étroit entre la gestion d'énergie et la taille des composants. Il serait donc souhaitable de disposer d'une description multi-architecture/multi-application qui fournisse de bons résultats sans nécessiter trop de ressources de calcul et qui est à la fois assez flexible pour autoriser une optimisation multi-critère.

La thèse de doctorat de Shiyu GAN (section 7.1.1.5) vise donc à développer un modèle multi-architecture/multi-application pour des systèmes hybrides [125], Figure 4.19. Le modèle global est structuré grâce à la Représentation Énergétique Macroscopique (REM) (section 4.2.2). Cette approche ne permet pas uniquement une structuration de modèles complexes ainsi que la déduction de la structure de commande basée sur l'inversion, mais également d'utiliser différentes descriptions pour le même composant. Il est regrettable que l'application actuelle de la REM sur Matlab/Simulink soit trop lourde pour une simulation en temps réel.

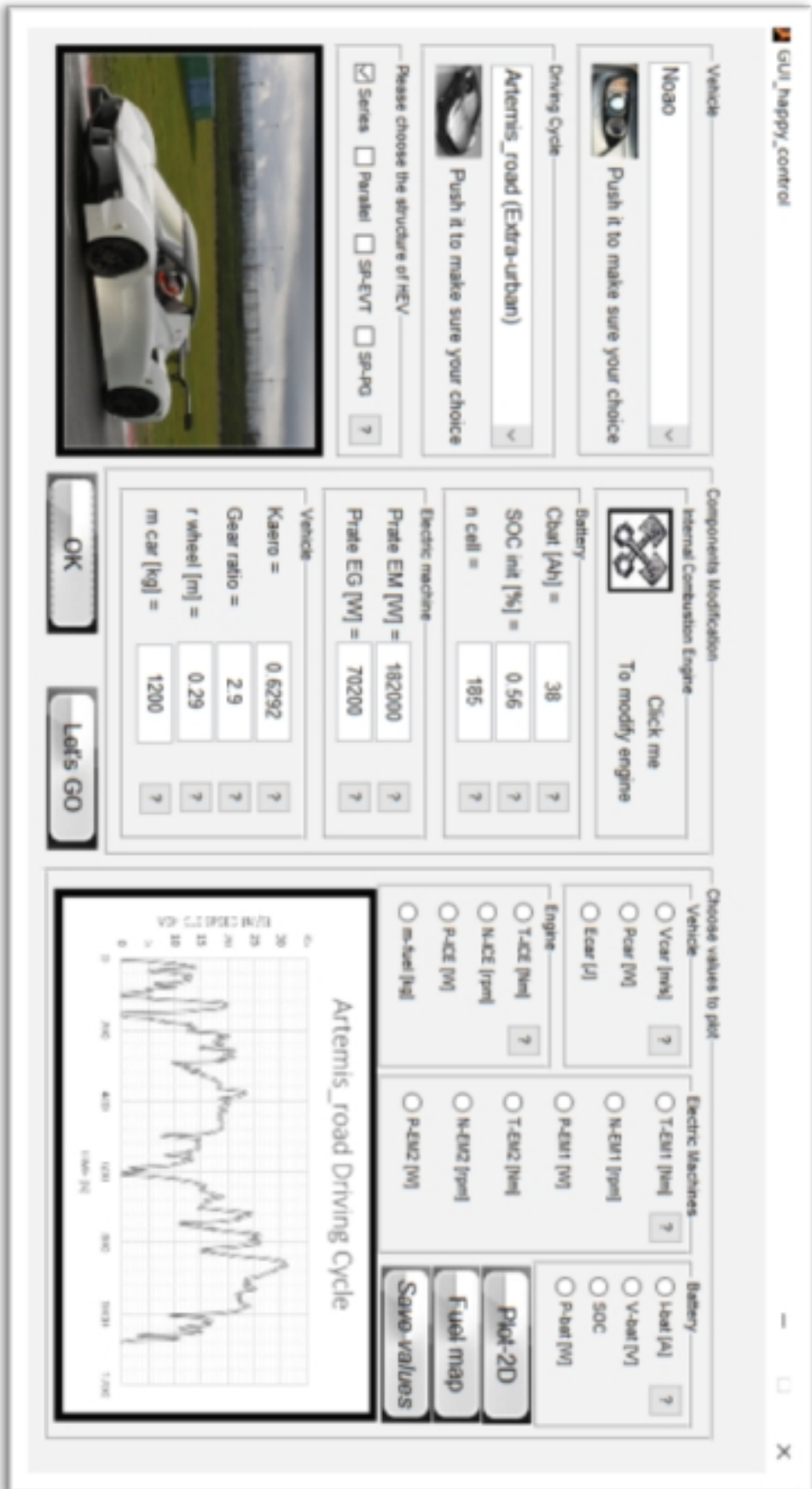


FIGURE 4.19 – Interface graphique pour modélisation multi-architecture/multi-application

COMPOSANTS

La modélisation multi-physique demande des modèles qui sont à la fois assez détaillés afin de montrer la variation de certains paramètres sur leur comportement et assez simple pour être effectué en temps réel. Pour cela le développeur doit avoir une compréhension globale de chacun des composants, sans être pour autant expert dans le domaine. Il reste désormais important de pouvoir échanger avec les experts afin de trouver la modélisation correspondant à la problématique actuelle.

Dans la plupart du temps, la modélisation peut être comparé à des données expérimentaux fourni par des composants réel. De plus, la modélisation multi-physique permet souvent une approche modulaire qui permet de commencer l'étude avec des descriptions de composants assez simple qui est dans la suite remplacé par un modèle plus détaillé.

Ce chapitre introduira des modèles de différents niveaux de complexité pour différents composants. Dans tous les cas, la modélisation a aidé de comprendre le fonctionnement du composant et d'acquérir les connaissances nécessaires pour échanger avec les experts dans le domaine.

5.1/ MOTEUR THERMIQUE

Les moteurs à combustion interne sont une compétence clé de l'équipe énergétique du laboratoire DRIVE. Dans le but global de diminuer les émissions de dioxyde de carbone, trois axes de développement sont poursuivis. Le premier axe vise à diminuer les émissions de façon globale ; un aspect de la recherche est la dépollution par plasma [126], un autre est l'utilisation de méthodes de combustion alternatives qui peuvent être étudiées en utilisant un tube à choc [13], une installation unique en France. Le deuxième axe vise à l'utilisation de carburants alternatifs, comme les biocarburants qui peuvent également être étudiés en utilisant le tube à choc, l'amélioration du taux d'utilisation du carburant par exemple améliorant l'injection [127] ou l'utilisation de différents carburants comme l'hydrogène en utilisant des piles à combustible [128] (Section 5.4). Le troisième axe de travail vise à augmenter le rendement globale du système de propulsion soit directement par exemple en utilisant un moteur à 5 temps [12, 129] ou en valorisant les rejets thermiques en utilisant un moteur Stirling (section 6).

En tant que membre du DRIVE j'ai pu apporter mes connaissances dans certains de ces axes, notamment à travers des travaux sur les piles à combustibles et le moteur thermique, mais j'ai surtout pu profiter du savoir existant afin d'enrichir mes travaux. La connaissances des moteurs thermiques a été intégré dans différents travaux comme la thèse de doctorat de Zainab ASUS (paragraphe 7.1.1.2), qui a permis de développer

les deux approches simples de modélisation d'un moteur thermique qui sont présentées dans la suite.

Ces modèles, qui restent très simplifiés, permettent désormais de développer des cartographies de consommation approximatives à partir de quelques paramètres facilement accessibles, et sont idéaux pour la modélisation multi-physique. La modélisation du moteur thermique est également utilisée dans le travail de thèse de doctorat de Shiyu GAN (paragraphe 7.1.1.5), qui profite de l'approche pour générer des cartographies de consommation de différents moteurs thermiques. Dans le cadre de ce travail on utilise plutôt des approches très simplifiées ainsi que des analyses macroscopiques.

5.1.1/ APPROCHE DE MODÉLISATION D'UN MOTEUR THERMIQUE SIMPLIFIÉE [3]

5.1.1.1/ APPROCHE SIMPLE

Une approche simple peut montrer à des personnes issues d'autres domaines de connaissance les aspects principaux des moteurs thermiques et permettre l'intégration des aspects de leur comportement (consommation et émissions) dans un contexte électrique. Cette approche simplifiée est, bien entendu, juste une toute première étape de description des moteurs thermiques et doit être affinée dès que des analyses plus précises sont requises.

Il existe un lien direct entre la cylindrée et le couple maximal d'un moteur comme présenté en Figure 5.1, obtenue grâce aux données statistiques. La cylindrée V_d est en cm^3 .

$$T_{max} = 0,0879V_d \quad (5.1)$$

Plus tard dans les travaux il s'est avéré que ce lien peut également être établi théoriquement. La puissance effective P_b peut être décrite de façon mécanique (Equ. 5.2) avec T le couple en $\text{N} \cdot \text{m}$, ω la vitesse en rad/s et N la vitesse en rpm , ou de façon thermique (Equ. 5.3) avec η_g le rendement global qui est entre 0,28 et 0,32, PCI le pouvoir calorifique inférieur qui est pour les carburants utilisés habituellement autour de $45 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ et le débit de carburant \dot{m}_{car} en $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

$$P_b = T \cdot \omega = \frac{T\pi N}{30} \quad (5.2)$$

$$P_b = \eta_g \cdot PCI \cdot \dot{m}_{car} \quad (5.3)$$

Le débit de carburant peut également être décrit en fonction du débit d'air \dot{m}_{air} en $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$, avec Φ la richesse qui peut avoisiner 1 et Ψ le ratio air carburant qui est habituellement entre 14,5 et 14,7 (Equ. 5.4).

$$\dot{m}_{car} = \frac{\dot{m}_{air} \cdot \Phi}{\Psi} \quad (5.4)$$

Le débit d'air peut être lié à la cylindrée V en m^3 en utilisant la vitesse de rotation N et la densité d'air ρ_{air} ($1,16 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) en utilisant l'équation 5.5, valable pour des moteurs à quatre temps non suralimenté.

$$\dot{m}_{air} = V \frac{N}{120} \rho_{Air} \quad (5.5)$$

En combinant ces observations et si on utilise V_d en cm^3 au lieu de V en m^3 on retrouve une équation qui propose un résultat numérique de 0,0868 et qui souligne donc les observations statistiques de Figure 5.1.

$$T = \frac{\eta_g}{4\pi} PCI \frac{\Phi}{\Psi} \rho_{air} \cdot V_d \cdot 10^{-6} \quad (5.6)$$

Une autre étude statistique sur différents moteurs présentée en Figure 5.2, montre que l'évolution du couple maximal T en fonction de la vitesse de rotation N peut être approximée en premier lieu par l'équation quadratique utilisant le couple maximal T_{max} présenté en équation 5.7.

$$T = (-4.2 \cdot 10^{-6}N^2 + 0,032N + 105) \frac{T_{max}}{165} \quad (5.7)$$

La consommation de carburant pour des moteurs à combustion interne peut être calculée sur la base de l'évaluation de la puissance effective (brake power), P_b , livrée par le moteur. Elle est la différence entre la puissance indiquée (gross indicated power) P_{ig} et les puissances perdues P_f , notamment dues aux frictions au niveau des segments (pistons), paliers (bearings) et autres composants mécaniques (Equ. 5.8).

$$P_b = P_{ig} - P_f \quad (5.8)$$

La puissance indiquée est normalement calculée à partir de la variation de pression à l'intérieur du cylindre pendant le cycle. Étant donnée que l'approche est basée sur la pression autrement dit sur la force appliquée durant le cycle, elle prend donc en compte tous les phénomènes qui ont lieu durant le cycle (combustion, échange de chaleur avec la paroi, pertes par pompage,...). Cependant, ce type de renseignements est rarement disponible durant la plage complète d'utilisation du moteur et quelques hypothèses simplificatrices doivent être faites pour évaluer la puissance disponible.

La puissance indiquée peut être calculée à l'aide du rendement indiqué (fuel indicated efficiency), $\eta_{f,i}$, qui peut se définir aussi par le rapport entre la puissance indiquée et la puissance carburant pour la combustion. La puissance délivrée par le carburant est calculée en utilisant le débit massique du carburant, \dot{m}_f en $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$, et son pouvoir calorifique

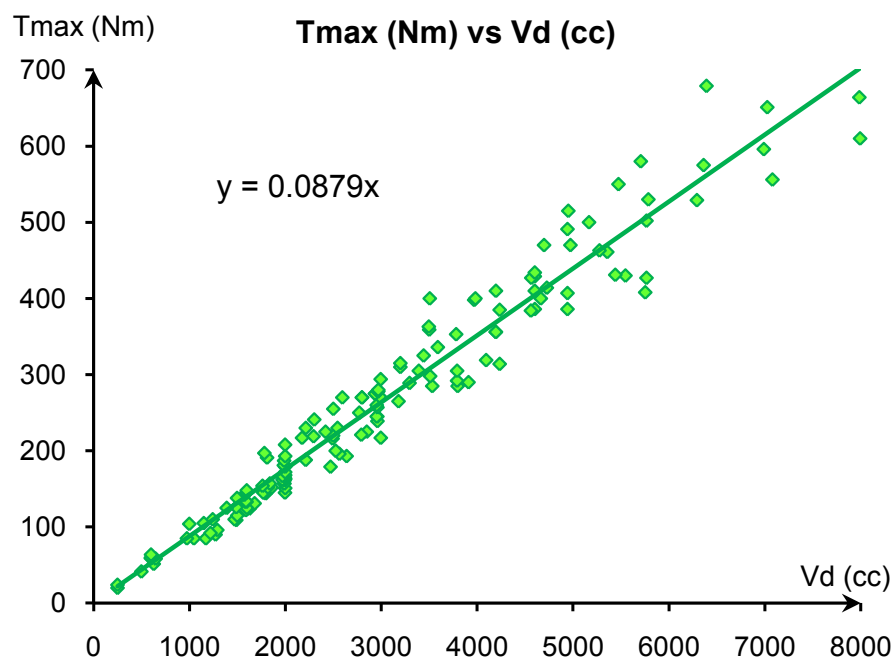


FIGURE 5.1 – Couple maximal des moteurs à essence

inférieur, PCI en $J \cdot kg^{-1}$, (Essence : $44 MJ \cdot kg^{-1}$; Diesel : $42,5 MJ \cdot kg^{-1}$).

Une première estimation, pour le rendement du carburant, donne une valeur de 40%. Cette estimation considère deux types de pertes : i) 30% de l'énergie disponible est perdue avec le gaz d'échappement chaud et ii) 30% de l'énergie est perdue dans le transfert de chaleur avec la paroi. Les 40% restant sont considérés comme rendement du carburant. Cette valeur, très approximative, est en accord avec les valeurs de rendement du carburant mesurées [130] mais doit être réévaluée, afin de prendre en compte le type de moteur (essence ou diesel, deux ou quatre temps) et les conditions d'utilisation du moteur (moteur à vide, moyen régime, plein régime).

Le rendement du carburant considère une combustion parfaite pendant laquelle toute l'énergie du carburant est libérée. Cette hypothèse peut s'avérer valable pour des vitesses faibles et jusqu'à un certain seuil car le rendement du processus de combustion augmente avec une vitesse d'utilisation croissante. En même temps la vitesse de rotation favorise le développement de la turbulence au sein du cylindre, cette turbulence favorise le développement de la combustion. Le rendement global augmente même si des phénomènes limitant existent également, par exemple l'augmentation de la vitesse réduit la durée de combustion. Une partie du carburant peut rester non brûlée à la fin de celle-ci. Ce gaz non brûlé s'explique par l'extinction de la flamme aux abords de la paroi et son coincement autour de la tête de piston. Une façon simple d'évaluer le rendement de combustion, η_c , est de considérer une évolution à l'inverse de la vitesse du moteur (Equ. 5.9).

$$\eta_c = \eta_{c0} - \frac{A}{B + N} \quad (5.9)$$

Dans cette équation, η_{c0} est égal à 0,98, les valeurs de A et B sont respectivement 300 et 2000. N est la vitesse du moteur en tr/min. Par conséquent, la puissance indiquée peut être calculée en utilisant (Equ. 5.10).

$$P_{ig} = \eta_{f,i} \left(\eta_{c0} - \frac{A}{B + N} \right) \dot{m}_f PCI \quad (5.10)$$

Pour calculer la puissance effective P_b , on a estimé la puissance de friction, P_f d'après la pression moyenne des pertes par frottement (friction mean effective pressure - $FMEP$). Ces pertes sont la somme de différents phénomènes, comme la friction des pistons, qui peuvent être indépendantes ou proportionnelles à la vitesse. Dans le cas le plus simple, on les quantifie en utilisant une équation linéaire en fonction de la vitesse du moteur, (Equ. 5.11) [130]. On considère une friction f de 100 kPa et un facteur f_p de 20.

$$FMEP = f + f_p N \quad (5.11)$$

Ensuite, la puissance effective est calculée en multipliant la pression moyenne des pertes par frottement ($FMEP$) avec le volume cylindrique, V_d , déplacé chaque seconde (Equ. 5.12).

$$P_f = (f + f_p N) \frac{V_d N}{R_c 60} \quad (5.12)$$

R_c est égal à 1 pour un moteur à deux temps et à 2 pour un moteur à 4 temps. Le débit massique peut simplement être évalué à partir de la demande de puissance de frein en formulant l'équation 5.13 en fonction du débit moteur et du volume cylindrique.

$$\dot{m}_f = \frac{P_e + (f + f_p N) \frac{V_d N}{R_c 60}}{\eta_{f,i} \left(\eta_{c0} - \frac{A}{B + N} \right) PCI} \quad (5.13)$$

5.1.1.2/ APPROCHE AMÉLIORÉE

L'approche améliorée consiste à créer un modèle thermodynamique zéro-dimensionnel, zone unique du moteur à combustion interne. Le but de ce modèle est d'évaluer l'influence de la vitesse et de la charge de la machine sur le rendement du carburant. $\eta_{f,i}$ est défini comme le ratio entre le travail transféré au piston grâce à la pression intérieure du cylindre et l'énergie théoriquement disponible dans le carburant fourni (Equ. 5.14). C'est la raison pour laquelle l'évolution de la pression à l'intérieur du cylindre, pendant le cycle du moteur, doit être connue.

$$\eta_{f,i} = \frac{\int -PdV}{m_{fuel}PCI} \quad (5.14)$$

Dans le cylindre, la pression, P , la température, T , et la composition du mélange de carburant et d'air sans variation, sont considérées homogène. Le gaz est supposé être un mélange homogène. Le modèle est gouverné par la conservation de la masse et de l'énergie.

La masse de mélange à l'intérieur du cylindre peut seulement changer à travers les soupapes (Equ. 5.15).

$$\frac{dm}{dt} = \frac{dm_{int}}{dt} + \frac{dm_{exh}}{dt} \quad (5.15)$$

où m est la masse à l'intérieur du cylindre et dm_{int}/dt (ou également dm_{exh}/dt) est le débit massique à travers la soupape d'admission ou d'échappement.

La première loi de la thermodynamique est appliquée au système ouvert qui échange de la chaleur à travers la paroi (Q_{wall}) et reçoit de la chaleur grâce à la combustion (Q_{comb}). Le travail transféré au piston à travers le volume intérieur du cylindre, V , est égal à $-P dV/dt$ (Equ. 5.16). u désigne l'énergie interne.

$$\frac{dmu}{dt} = \frac{dW}{dt} + \frac{dQ}{dt} = -P\frac{dV}{dt} + \frac{dQ_{wall}}{dt} + \frac{dQ_{comb}}{dt} \quad (5.16)$$

Comme les inconnues du système sont la pression, la température et la masse à l'intérieur du cylindre, il faut une troisième équation pour résoudre le problème. On utilise la loi des gaz parfaits dans la représentation dérivée (Equ. 5.17).

$$P\frac{dV}{dt} + V\frac{dP}{dt} = \frac{dm}{dt}rT + m\frac{dr}{dt}T + mr\frac{dT}{dt} \quad (5.17)$$

où r est la constante des gaz idéaux ($r = R/M$). Comme la composition du mélange est considéré constante, on peut conclure que $dr/dt = 0$.

Pour résoudre le problème, il faut utiliser des modèles existants pour évaluer le débit massique à travers les soupapes, la quantité de chaleur échangée avec la paroi et la chaleur libérée durant la combustion.

Le débit massique est calculé avec l'hypothèse d'un écoulement quasi permanent à travers la vanne et un flux compressible. Le flux généré est dû à la différence de pression entre le flux amont (us) et le flux aval (ds) tant que $P_{us} \geq P_{ds}$. Le débit massique dépend des conditions en amont (pression P_{us} , température T_{us}) et de la pression en aval, P_{ds} (Equ. 5.18).

$$\frac{dm}{dt} = AC_d P_{us} \sqrt{\frac{2\gamma}{(\gamma-1)rT_{us}} (X^{\frac{2}{\gamma}} - X^{\frac{\gamma+1}{\gamma}})} \quad (5.18)$$

TABLE 5.1 – Validation du modèle en L/100km

		Toyota Camry	Alfa Ro- meo	BMW 320i	Renault Clio	Honda Jazz 1.5	Suzuki Alto
		2.4	159 2.2 JTS		1.6 16V (2009)	VTEC (2008)	1.0 (2009)
ECE R15	Constructor	10.7	13	10.8	9.0	8.4	5.5
	Thermo	11.10	12.60	11.15	9.19	8.67	5.33
	Simple	8.34	10.89	9.39	7.36	6.93	4.12
	Error _{thm} (%)	3.7	-3.1	3.2	2.1	3.2	-3.1
	Error _{sim} (%)	-22.1	-16.2	-13.1	-18.2	-17.5	-25.1
EUDC	Constructor	7.1	7.3	6.2	6.1	5.5	3.8
	Thermo	7.86	7.97	6.91	6.71	6.12	4.28
	Simple	6.38	7.04	5.77	5.69	5.19	3.67
	Error _{thm} (%)	10.7	9.2	11.5	10.0	11.3	12.6
	Error _{sim} (%)	-10.1	-3.6	-6.9	-6.7	-5.6	-3.4

où

$$X = \frac{P_{ds}}{P_{us}} \leq \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (5.19)$$

L'échange thermique avec la paroi est considéré comme une convection forcée (Equ. 5.20) dans laquelle le coefficient de transfert de chaleur est calculé en utilisant la corrélation définie par Han et al. [131].

$$\frac{dQ_{wall}}{dt} = hS(T - T_{wall}) \quad (5.20)$$

Enfin, le taux de dégagement de chaleur, dQ_{comb}/dt , est évalué empiriquement grâce à la loi de combustion de Wiebe [132] qui est largement utilisée dans les modèles pour moteurs à combustion interne [130]. Cette loi (Equ. 5.21) considère une évolution exponentielle de la chaleur relâchée durant la combustion, commençant à un angle vilebrequin θ_i situé avant le point mort haut avec une durée de combustion de $\Delta\theta$.

$$Q_{comb} = m_{fuel}PCI \left(1 - e^{-a\left(\frac{\theta - \theta_i}{\Delta\theta}\right)^{n+1}}\right) \quad (5.21)$$

5.1.1.3/ VÉRIFICATION DE LA MÉTHODOLOGIE

L'approche présentée a été validée pour différents moteurs à combustion interne de différentes tailles sur de multiples cycles de conduite. Les résultats sont présentés dans le Tableau 5.1.

On peut voir que l'approche simple donne une première idée de la consommation de carburant. Pour le cycle extra urbain, comme le EUDC, le modèle sous-estime en général la consommation de carburant de 10%. Pour des cycles urbains, comme le EDE15, la précision de l'approche est moins bonne avec une sous-estimation inférieure à 25%. L'approche thermodynamique améliore largement les prédictions des consommations de carburant pour le cycle urbain avec une erreur maximale de 3.7%, mais montre une sur-estimation de 13% pour le cycle extra urbain. Les divergences pour les cycles urbains

peuvent s'expliquer par l'évaluation du rendement du carburant. On avait choisi une valeur constante pour toutes les conditions d'utilisation, tout en sachant que $\eta_{f,i}$ devrait varier en fonction de la vitesse et de la charge sur le moteur comme indiqué dans le modèle thermodynamique. Ces écarts peuvent être expliqués par le fait que ce modèle reste simplifié (zéro-dimensionnel) et ne prend pas en compte les phénomènes tri-dimensionnels comme la couche limite ou des phénomènes acoustiques à l'intérieur des conduits d'admission et d'échappement [130].

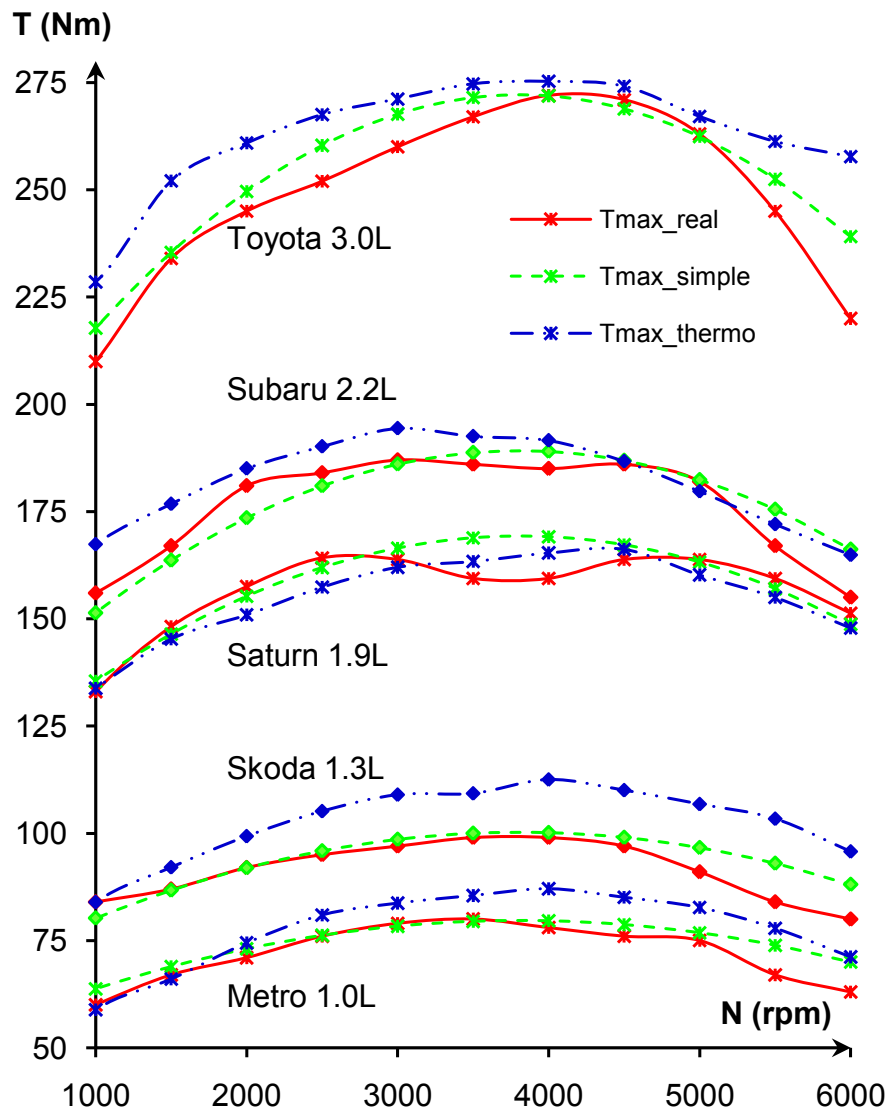


FIGURE 5.2 – Ligne des couples maximaux pour différents moteurs

5.1.2/ INFLUENCE DES PARAMÈTRES MÉTÉOROLOGIQUES

Un travail additionnel, commencé dans le contexte du stage de fin d'études de Baptiste VALET (section 7.1.3.1), vise à quantifier l'influence des conditions extérieures et des auxiliaires sur la consommation de carburant d'un véhicule.

5.1.2.1/ CONTEXTE DE TRAVAIL

Le but de ce projet était de créer un modèle numérique permettant de mettre en évidence l'influence du conducteur et des conditions extérieures, telles que la pression, la température et l'ensoleillement, sur les besoins énergétiques nécessaires à la propulsion d'un véhicule et de ses auxiliaires. Ces derniers sont très nombreux, mais nous sommes essentiellement concentrés sur la climatisation, car c'est l'auxiliaire demandant le plus d'énergie. Ce projet se distingue de ceux que l'on peut trouver dans la littérature, car il regroupe une étude thermique relativement complète et une modélisation moteur 3 zones basée sur les principes fondamentaux de la thermodynamique. En effet, de nombreuses études ont été réalisées sur ces mécanismes, mais très peu l'on fait simultanément.

La première partie du projet de fin d'études a été dédiée à la création d'un modèle d'échanges thermiques avec MATLAB/Simulink dans le but d'obtenir la variation de la température à l'intérieur de l'habitacle. Pour la valider, les résultats ont été comparés avec des résultats extraits de la littérature.

Ensuite la modélisation d'un moteur thermique a été effectuée. Le moteur modélisé est un moteur à combustion interne quatre cylindres à allumage commandé de 1,2 L de cylindrée et développant 75 ch. Le programme créé permet d'obtenir la puissance, le couple et la consommation du moteur en fonction du régime et de l'ouverture du papillon en fonction de la température et la pression ambiante. Les résultats obtenus pour la consommation spécifique effective et la pression moyenne effective étaient cohérents ce qui a permis de valider le modèle.

Enfin, une étude paramétrique a été réalisée pour identifier lesquels était le plus influent sur la consommation et pour mettre en évidence la surconsommation apportée par le système de climatisation. Après analyse des résultats, il s'avère que c'est la pression du milieu extérieure qui va impacter le plus la consommation de carburant avant même la température et le comportement du conducteur.

5.1.2.2/ RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Influence de la température

Pour évaluer l'influence de la température, trois aspects ont été pris en compte, notamment le rayonnement du soleil, la conduction de la chaleur de l'extérieur vers l'habitacle, la convection forcée due à la vitesse du véhicule et la convection à l'intérieur de l'habitacle, Figure 5.3.

Ce système peut être décrit par un système d'équations différentielles (Equ. 5.22), (Equ. 5.23), (Equ. 5.24) et (Equ. 5.25).

$$Q_{conv,e} = (h_{ext} + h_{ray})S_{parebrise}(T_{paroi,e} - T_{ext}) \quad (5.22)$$

$$Q_{cond} = \frac{\lambda_{verre}S_{parebrise}}{e_{parebrise}}(T_{paroi,e} - T_{paroi,i}) \quad (5.23)$$

$$Q_{conv,i} = h_{int}S_{parebrise}(T_{paroi,i} - T_{int}) \quad (5.24)$$

$$m_{air}C_{pair}\frac{dT_{air}}{dt} = h_e\frac{dm_e}{dt} - h_s\frac{dm_s}{dt} + \frac{dQ}{dt} \quad (5.25)$$

L'influence de la vitesse du véhicule sur la température dans l'habitacle a été étudiée, pour le cas d'une température extérieure de 30 °C et d'un flux solaire de 880 W · m⁻². La Figure 5.4 montre l'évolution de la vitesse et de la température dans l'habitacle. Du fait de la convection forcée on peut voir que la température monte quand le véhicule est à l'arrêt et descend quand il roule.

Comme en général on souhaite une température constante d'environ 20 °C, si elle est en dessous on va chauffer l'habitacle via la chaleur du liquide de refroidissement moteur et dans le cas contraire on va le refroidir en utilisant la climatisation. La chaleur du liquide de refroidissement est disponible et son utilisation engendre peu de besoin d'énergie supplémentaire, à l'inverse de la climatisation qui nécessite de l'énergie entraînant une surconsommation considérable. La vitesse de ventilation est ajustée automatiquement pour atteindre la température consigne le plus vite possible.

La régulation est relativement précise lorsque l'on refroidit ou chauffe l'habitacle. Les résultats de simulation nous indiquent la surconsommation apportée par le système de climatisation. En effet, une température extérieure de 30 °C, amène à une consommation moyenne de 6,73 L/100km sans climatisation contre 7,12 L/100km soit une augmentation de 0,39 L/100km. Cette valeur sera plus ou moins importante suivant la température de consigne fixée par le conducteur et celle de l'extérieur. Si l'on se réfère à la littérature, Michael Sivak et Brandon Schoettle [133] ont trouvé que l'utilisation de la climatisation pouvait engendrer une surconsommation de 5 à 25%, ici nous sommes à 5,8%.

Influence de la pression

Deuxièmement, on étudie l'influence de la pression avec une température externe de 17 °C et un rayonnement solaire de 880 W · m⁻². La variation de pression sera l'image de l'altitude à laquelle se trouve le véhicule. En montagne, il est possible d'atteindre les 800 mbar et au niveau de la mer 1000 mbar.

La Figure 5.5 montre des variations similaires à la température, car les phénomènes mis en jeu sont proches. En effet, une augmentation de la pression extérieure va faire augmenter la masse volumique de l'air tout comme une diminution de la température (dans des proportions différentes). Ainsi, on retrouve bien ce surplus de consommation lorsque la pression est plus grande et pour une ouverture du papillon identique, le conducteur aura plus de puissance et le véhicule aura une plus forte accélération. Cependant, à plus faible pression, les forces aérodynamiques vont diminuer ce qui va tendre à réduire la différence de performance entre les deux cas.

Influence du conducteur

Pour étudier l'influence du comportement du conducteur sur la consommation on agit sur deux paramètres : l'ouverture du papillon (qui est l'image du pourcentage d'appui sur la pédale) et le régime moteur auquel il va passer ses vitesses. Deux types de conducteur

ont donc été distingués, un plutôt doux et un autre qui a une conduite dynamique. Dans le premier cas, nous avons fixé une ouverture maximale du papillon à 33%, un passage de rapport supérieur à 3 500 tr/min et un passage de rapport inférieur à 1 900 tr/min. Dans le second cas, nous avons fixé une ouverture maximale du papillon à 100%, un passage de rapport supérieur à 5 500 tr/min et un passage de rapport inférieur à 2 100 tr/min. Les conditions du milieu extérieur sont les suivantes : la pression est fixée à 1 bar, la température à 25 °C et l'ensoleillement à $880 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. La Figure 5.6 montre le résultat de ces essais.

On constate une augmentation de la consommation de 24,5% pour le conducteur le plus dynamique. Ce résultat est en accord avec ce que l'on peut trouver dans la littérature. Michael Sivak et Brandon Schoettle [133] ont trouvé qu'une conduite agressive pouvait être synonyme d'une augmentation de la consommation de l'ordre de 20 à 30%. C'est également le résultat décrit un travail antérieur [1], qui trouve une augmentation de la consommation de 20% entre deux styles de conduite. Les deux paramètres, l'ouverture du papillon et le régime de changement de rapport, ont une importance capitale. Si l'on change uniquement l'ouverture papillon, on a une augmentation de l'ordre de 10%.

Conclusion

Le projet de fin d'études de Baptiste VALET a permis d'étudier l'influence des paramètres environnementaux (température, pression) et le comportement du conducteur sur la consommation d'un véhicule thermique. Ce travail est une première étape vers une approche globale d'évaluation des besoins d'énergie d'un véhicule. Ceci est particulièrement important dans le contexte des véhicules électriques, qui ont un besoin réduit d'énergie pour la propulsion grâce au bon rendement des moteurs électriques mais qui ont des capacités de batterie limitées. L'influence des conditions environnementales et le comportement du conducteur peuvent donc agir grandement sur l'autonomie. Ce fait devient crucial dans le cas de véhicules hybrides plug-in dont l'objectif est d'arriver aux points de recharge avec une charge minimale de batterie.

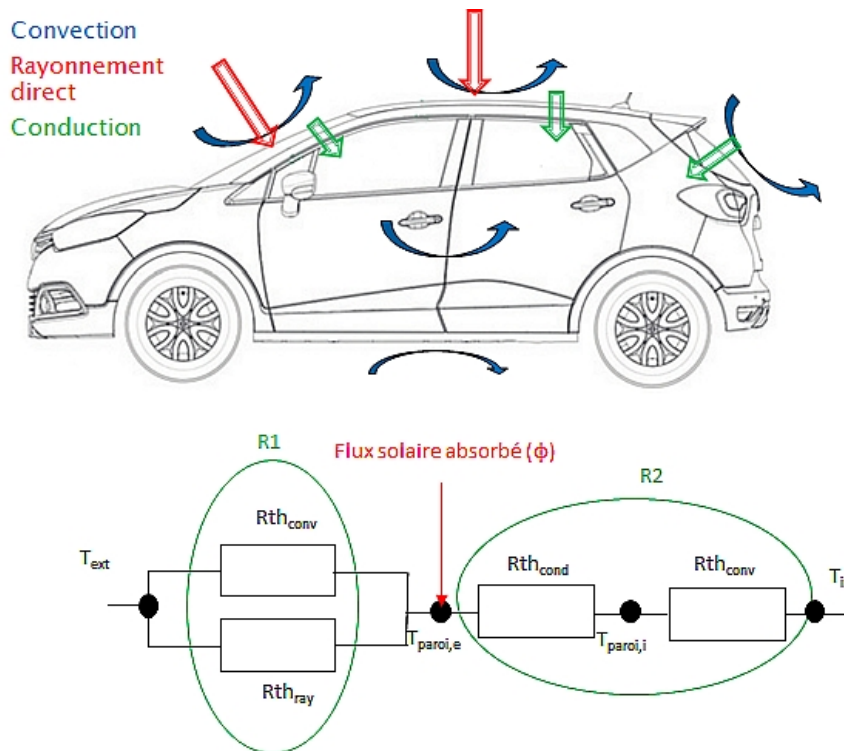
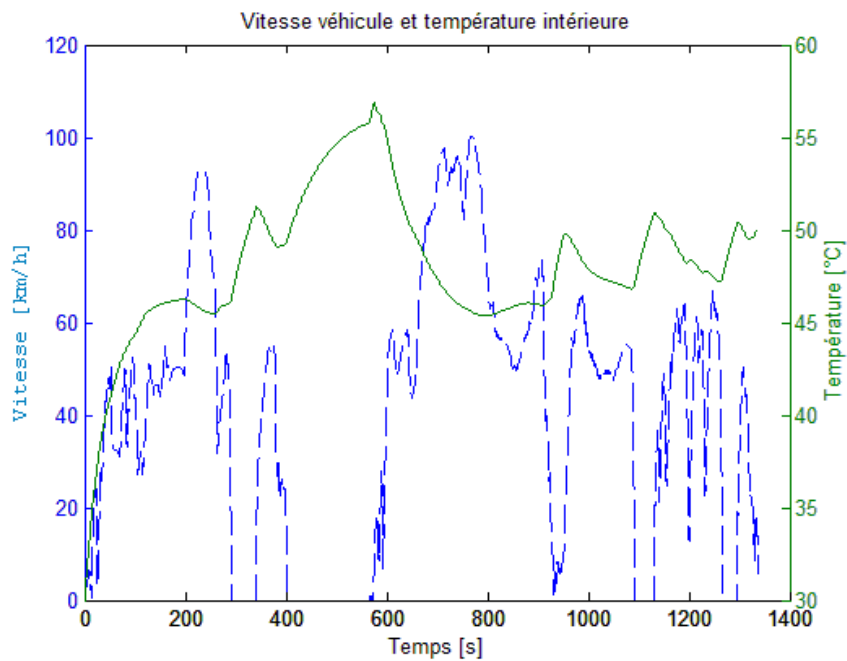


FIGURE 5.3 – Échanges de chaleur de l'extérieur vers l'habitacle

FIGURE 5.4 – Température dans l'habitacle sans régulation (Température=30 °C, flux solaire de $880 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)

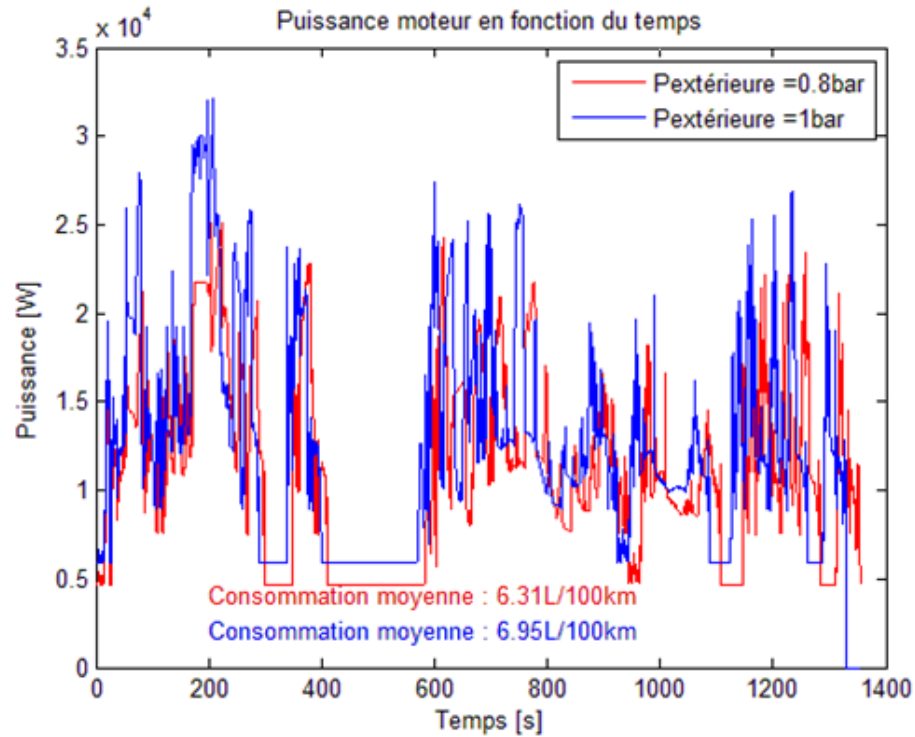


FIGURE 5.5 – Influence de la pression sur la consommation (Température=17°C, flux solaire de $880 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)

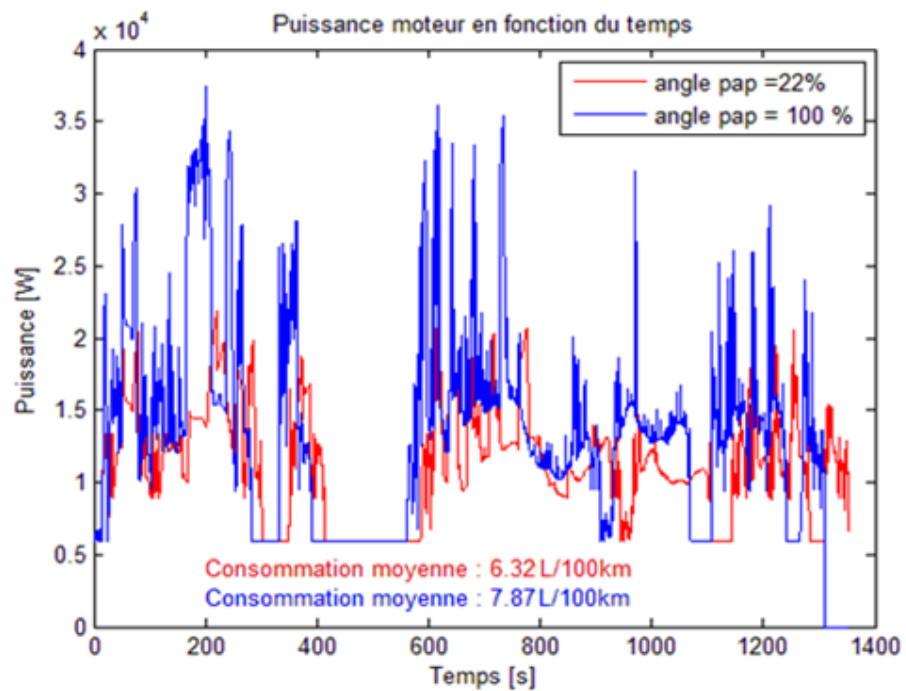


FIGURE 5.6 – Influence du conducteur sur la consommation (Température=23°C, flux solaire de $880 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, pression 1 bar)

5.1.2.3/ AMÉLIORATION DE LA DESCRIPTION DES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES

Après ce premier projet de fin d'études, le travail est poursuivi à travers un autre projet de recherche qui vise à affiner la description des conditions météorologiques et des autres auxiliaires consommateurs. Ce projet a été réalisé par Carlos DAMAS un étudiant en échange Erasmus de l'Universidad Politécnica de Madrid qui a effectué son projet de fin d'études Bachelor dans notre département (paragraphe 7.1.3.2).

Le travail de Baptiste Valet a permis d'estimer la consommation d'énergie d'un véhicule conventionnel en prenant en compte les paramètres température, pression et irradiation. En général, ces trois paramètres sont liés par les conditions météorologiques. La première étape du travail de Carlos Damas consistait donc à consulter des bases de données afin de récupérer les températures, pressions et irradiations d'un endroit et de les lier dans le modèle. Les données d'irradiation disponibles représentant l'énergie reçu par jour étaient en $J \cdot cm^{-2}$ et la grandeur nécessaire à la modélisation en $W \cdot m^{-2}$. L'énergie solaire était donc moyennée pour en déduire la puissance en prenant compte de l'angle azimut.

La Figure 5.7 montre donc la variation du besoin d'énergie d'un véhicule en fonction des données météorologiques, sur une période de cinq ans. On remarque que le besoin d'énergie est maximal durant l'été quand le véhicule doit être climatisé. En hiver, le besoin de chauffage montre une faible influence sur la consommation. Il est minimal pendant le printemps et l'automne.

Grâce à une étude qui s'étale sur cinq années, il est mis en évidence que le besoin d'énergie varie peu au printemps et en automne et que les plus grandes fluctuations de besoin d'énergie se trouvent en été. Ce phénomène peut facilement s'expliquer par le fait que d'une année à l'autre les températures et l'irradiation peuvent grandement varier à cette saison.

La deuxième partie du projet portait sur l'analyse de l'influence des auxiliaires sur le besoin d'énergie dans un véhicule. Pour cela, une étude des autres consommateurs d'énergie est menée et trois journées types, avec différents profils d'utilisation d'auxiliaire, sont établies. Le résultat, présenté en Tableau 5.2, montre que l'influence des auxiliaires est assez faible en temps normal. Une variation de 0,3 L/100km du même ordre de grandeur que la variation due aux conditions météorologiques, est observée uniquement dans les cas extrêmes.

TABLE 5.2 – Validation du modèle en L/100km

	Power Consumption (W)	Test 1 (Normal day)	Test 2 (Rainy Day)	Test 3 (Foggy day)
Day lights	10	ON	ON	ON
Night lights	232	OFF	OFF	ON
Foggy lights	131	OFF	OFF	ON
Wheel pressure	45	ON	ON	ON
Central screen	7	ON	ON	ON
Central locking	5	ON	ON	ON
Rearview mirror	2	ON	ON	ON
Charger	7	OFF	ON	ON
Lighter (60s)	100	OFF	ON	ON
Radio	20	OFF	ON	ON
Wipers	72	OFF	ON	ON
Total (W)	631	69	268	631
Consumption (l/100 km)		6,955	6,972	7,297

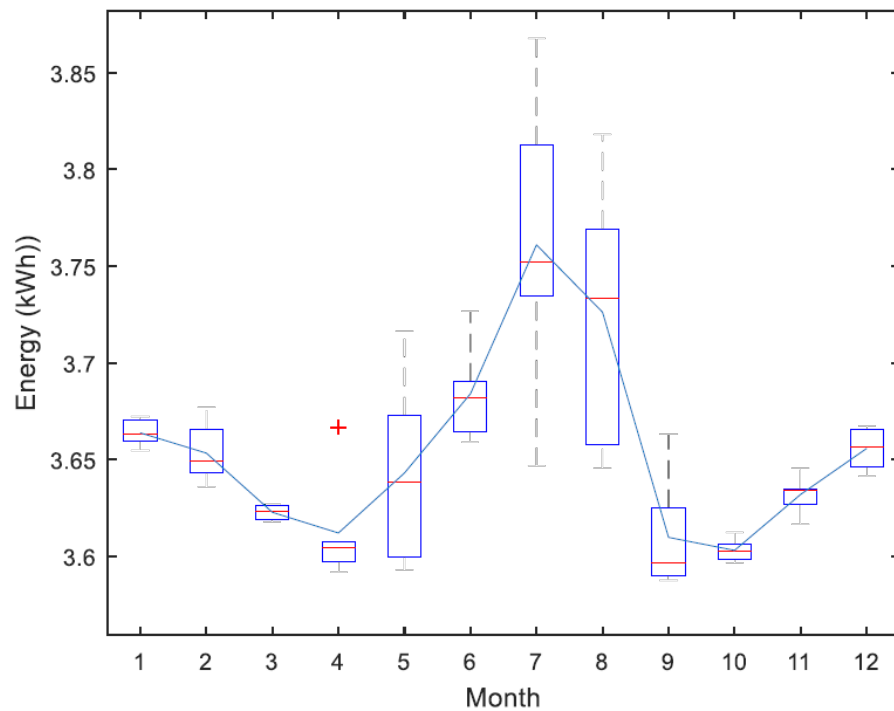


FIGURE 5.7 – Variation du besoin d'énergie sur l'année en fonction des données météorologiques

5.2/ MODÈLE SIMPLE D'UNE MACHINE SYNCHRONNE À AIMANTS PERMANENTS

Comme Carlos DAMAS était issu du programme "Bachelor of Electrical Engineering" de l'Universidad Politécnica de Madrid (paragraphe 7.1.3.2) il était important pour nous d'intégrer des aspects électrotechniques dans son projet de recherche. Son travail portait donc sur le développement d'un modèle simple permettant de développer une cartographie des rendements des machines synchrones à aimants permanents (MSAP - Permanent Magnet Synchronous Machines PMSM) qui sont souvent utilisées pour la propulsion électrique. Les cartographies sont largement répandues pour la propulsion thermique. A cause de la complexité des moteurs thermiques, il n'est pas possible de recalculer assez rapidement chaque point de fonctionnement durant une simulation. Pour cette raison, on établit des cartographies de rendements stationnaires pour chaque point e fonctionnement grâce à de simples lookup tables.

Les machines électriques sont avantageuses pour la propulsion électrique car elles peuvent avoir des rendements autour de 90% au lieu de 30% pour des moteurs thermiques. Il existe une multitude de machines électriques [102] et plusieurs types sont bien adaptés pour ce travail [65], mais les MSAP sont majoritairement utilisées.

Les MSAP sont, en général, formées par un stator bobiné en triphasé pour créer un champ magnétique tournant et un rotor qui contient des aimants permanents en Neodymium. C'est donc un système sans contact (brushless) où l'énergie est transférée uniquement de façon électromagnétique, limitant les pertes par frottement et celles dues à l'effet Joule, et menant donc à un rendement élevé. L'étude de Carlos Damas s'est concentrée en premier lieu sur la fabrication d'un modèle qui est capable de reproduire la cartographie du MSAP avec les paramètres présentés en Tableau 5.3. L'objectif était néanmoins que par la suite la même approche puisse être utilisée sur d'autres MSAP tout comme nous l'avons envisagé lors de la modélisation du moteur thermique introduit en section 5.1.

Le modèle établi dans ce cadre peut par la suite être utilisé, entre autre, dans le projet de modélisation multi-architecture/multi-application développé pendant le doctorat de Shiyu GAN (paragraphe 7.1.1.5), permettant de fournir rapidement des cartographies de rendement de différentes MSAP en changeant uniquement les paramètres d'entrée du modèle.

TABLE 5.3 – Paramètres de la MSAP

Nombre de pôles	8	
Puissance nominale	68	kW
Tension nominale	400	V
Couple nominal	325	Nm
Vitesse nominale	2 000	rpm
Vitesse maximale	6 000	rpm
Lq	0.89	mH
Ld	0.58	mH

Pour déterminer les rendements à différents points de fonctionnement, définis par la vitesse de rotation et le couple, on se sert des transformations de Clark et de Park, qui permettent, grâce à un référentiel rotatif, d'utiliser les approches de gestion développées

pour des machines à courant continu, comme présenté en Figure 5.8.

$$T_{em} = K \cdot \Phi \cdot I \tag{5.26}$$

$$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega \tag{5.27}$$

$$\Phi = f(I_e) \tag{5.28}$$

avec T_{em} le couple électromagnétique, K une constante, I le courant, Ω la vitesse de rotation, Φ le champ magnétique et I_e le courant d'excitation.

Pour décrire le système, il faut distinguer deux modes de fonctionnement. Le premier en dessous de la vitesse nominale : le système est limité par son flux maximal pendant lequel le courant est constant et la tension augmente linéairement. Le deuxième, au dessus la vitesse nominale : le système est limité par la puissance maximale et le rapport entre tension et flux reste constant, Figure 5.9. La machine peut donc être contrôlée uniquement à travers un seul paramètre, le courant statorique, car le champ rotorique est imposé par les aimants permanents.

On utilise la commande vectorielle avec un courant direct mis à zéro pour notre approche [14] qui mène aux équations suivantes :

$$\lambda_q = L_q \cdot i_q \tag{5.29}$$

$$\lambda_d = L_d \cdot i_d + \Lambda_{pm} \tag{5.30}$$

$$\Lambda_{pm} = \frac{\sqrt{2} \cdot (E_{af})_{rated}}{(\omega_e)_{rated}} \tag{5.31}$$

avec d et q l'indication pour les directions directs et quadratiques, λ le flux, L l'inductance et Λ_{pm} le flux magnétique de l'aimant permanent qui dépend de E_{af} , la tension à vide nominale et de ω_e , la vitesse de rotation nominale. On peut en déduire les tensions :

$$v_q = R_s \cdot i_q + \frac{d}{dt} \cdot \lambda_q + \omega_r \cdot \lambda_d \tag{5.32}$$

$$v_d = R_s \cdot i_d + \frac{d}{dt} \cdot \lambda_d + \omega_r \cdot \lambda_q \tag{5.33}$$

avec R_s la résistance du stator. On peut donc calculer le couple pour le cas le plus facile ou $i_d = 0$ selon :

$$T = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Lambda_{pm} \cdot i_q \tag{5.34}$$

avec p le nombre de paires de pôles. On constate que le couple dépend uniquement du courant quadratique. Cette approche permet la mise en place du contrôle vectoriel.

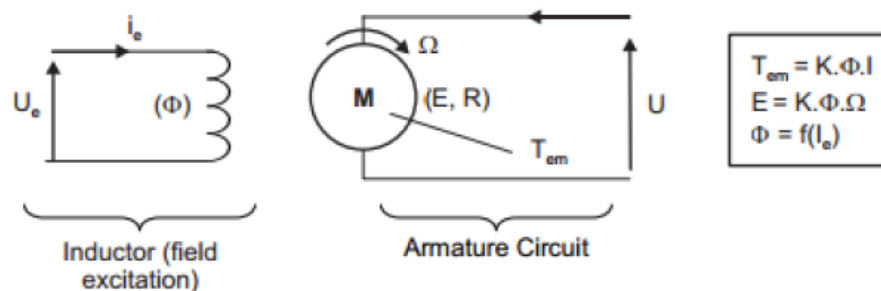


FIGURE 5.8 – Machine à courant continu à excitation séparée

En plus des représentations du couple et de la vitesse, il est important de prendre en compte les différentes pertes. Les pertes par effet joule dues au passage du courant dans les conducteurs, peuvent être calculées selon :

$$P_j = m \cdot R_s \cdot I_{ph}^2 \quad (5.35)$$

avec m le nombre des phases et I_{ph} la valeur efficace du courant statorique. Les pertes mécaniques peuvent être décrites par :

$$P_{mec+v} = 0.8 \cdot 2p \left(\frac{\pi \cdot D_r \cdot n}{2400} \right)^3 \sqrt{\frac{l_{Fe}}{19}} 10^3 \quad (5.36)$$

avec l_{Fe} la largeur du stator, D_r le diamètre du rotor et n la vitesse de rotation en tour par minute.

Les pertes magnétiques et les pertes de Foucault sont souvent négligées, des analyses empiriques montrant qu'elles ne représentent environ que 0,1% de la puissance nominale du moteur. Cependant, ils peuvent devenir importants pour certains moteurs et certaines fréquences d'utilisation.

L'approche présentée ci-dessous nous a permis d'établir une cartographie de rendements (Figure 5.10) de la MSAP détaillée en Tableau 5.3. Cette approche simple, cohérente avec la documentation de référence, nous donne donc la possibilité de créer des cartographies des différentes MSAP et rejoint en quelques sorte les efforts faits pour les moteurs thermiques présentés en 5.1.

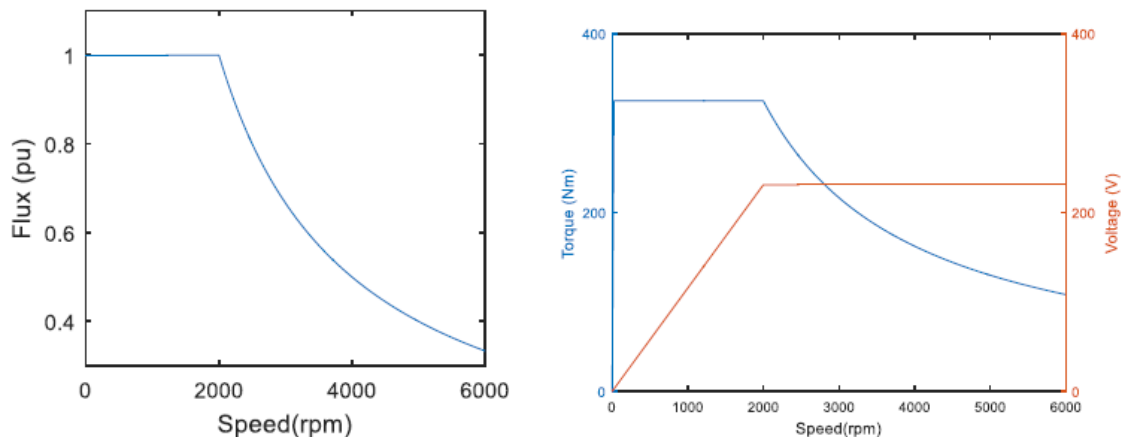


FIGURE 5.9 – Représentation du flux, tension et couple en fonction de la vitesse pour une MSAP

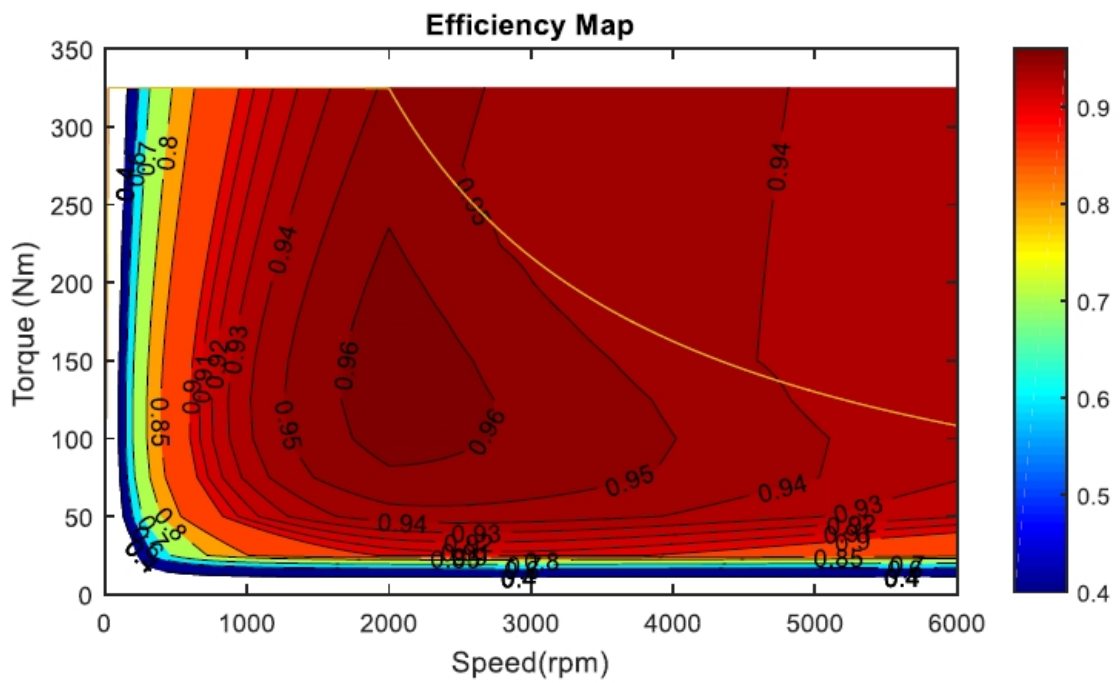


FIGURE 5.10 – Cartographie de rendements pour une MSAP sans convertisseur

5.3/ BATTERIE LITHIUM-ION

5.3.1/ BATTERIES UTILISÉES POUR LE TRANSPORT

Nous utilisons, en général, le mot batterie pour désigner un élément qui fournit une énergie électrique à partir d'une réaction électrochimique fermée. Strictement parlant, un tel élément devrait être appelé élément galvanique ou élément électrochimique. Le mot batterie décrit, à la base, l'empilement de plusieurs éléments électrochimiques. Il existe parfois une confusion avec le mot accumulateur, qui est censé différencier les éléments électrochimiques rechargeables et non-rechargeables. Le mieux serait de les décrire comme éléments électrochimiques primaires, quand ils ne sont pas rechargeables, et éléments électrochimiques secondaires, quand ils le sont.

Dans le contexte du transport, on utilise en grande majorité un empilement d'éléments électrochimiques rechargeables, d'où ce terme batterie qui est finalement bien approprié.

La suite introduit la structure générale d'un élément électrochimique et des valeurs clés sont présentées avant la description des différents types de batteries utilisés dans le transport.

Les éléments galvaniques ou électrochimiques sont constitués de deux électrodes (cathode et anode) séparées montées avec un séparateur entre elles et immergées dans une électrolyte suivant la structure présentée en Figure 5.11. Les électrodes qui sont constituées d'un matériau conducteur (en général des métaux) ont un potentiel d'oxydoréduction qui est caractérisé par la tendance du matériel à acquérir des électrons provenant d'une électrode de référence qui est définie à 0 V. L'électrode avec le potentiel plus élevé s'appelle cathode durant la décharge, l'autre s'appelle anode. Même si le nom des électrodes change durant la charge, on utilise en général la convention de décharge. Quand les deux électrodes sont connectées à une charge électrique, un courant se crée grâce à la différence des potentiels standards de réduction.

Sur chaque électrode, une semi-réaction a lieu, elle fournit ou reçoit des électrons et des ions d'où leur présence dans le système. Les électrons vont d'une électrode à l'autre à travers la charge externe, les ions traversent l'électrolyte. Ce dernier est alors un conducteur ionique. Dans la grande majorité des cas, l'électrolyte est liquide, mais tout matériel qui répond aux besoins (isolation électrique et conduction ionique) peut être utilisé. Les éléments utilisant des électrolytes secs sont appelés cellules sèches, si l'électrolyte est capté dans un polymère, on parle d'une cellule polymère.

La distance entre les électrodes étant assez petite, il faut éviter les court-circuits dus aux contacts directs. C'est pourquoi un séparateur est placé entre les électrodes, il assure l'isolation électronique, mais permet aux ions de le traverser.

Pour caractériser les batteries, on peut utiliser différentes grandeurs. Les principales sont présentées dans la suite :

- **Tension de circuit ouvert** : La tension de circuit ouvert ou Open Circuit Voltage (OCV) décrit la tension entre les bornes de la cellule en circuit ouvert. Elle est en grande partie imposée par le potentiel standard de réduction, mais elle est également une fonction monotone de l'état de charge. L'âge ou la température de la cellule peuvent faire varier la résistance interne et entraîner une chute de cette tension. Par contre, une résistance ne suffit pas à décrire le comportement, il y a également un effet capacitif lent dû à des propriétés de cinétique électrochimique. Il faut donc plusieurs minutes après la fin d'utilisation d'une cellule pour retrouver la tension de circuit ouvert.

- **Densité d'énergie et de puissance** : Afin de pouvoir comparer différents types de batteries et autres éléments de stockage, on utilise la densité d'énergie comme valeur de référence. Pour cela, on fait le rapport entre la capacité d'énergie (ou de puissance) et la masse ou le volume de la batterie. Ce qui nous en donne quatre : le rapport d'énergie spécifique, ou puissance spécifique, ou la densité d'énergie, ou la densité de puissance. Ces valeurs permettent d'estimer la quantité d'éléments de stockage qui doit être embarquée pour délivrer une énergie ou une puissance requise. Ce moyen d'évaluation est particulièrement important dans le transport, car en général le poids admissible est limité et celui du stockage d'énergie est considérable par rapport à la masse du système.
- **Capacité** : La capacité est la quantité d'énergie qui peut être stockée dans une batterie. Même si l'énergie stockée est définie par l'intégrale de la puissance sur le temps ($E = \int P dt$), dans le contexte des batteries, on utilise souvent la capacité coulombétrique. Du fait que l'on considère la tension de la batterie comme presque constante, le produit du courant et du temps donne une mesure de la capacité d'énergie ($CA = I \cdot \Delta t$). De plus, comme la tension est imposée par la composition de la batterie, la capacité coulombétrique est une mesure de la taille de la batterie.
- **State of Charge (SOC)** : Le state of charge (SOC) ou état de charge répond au besoin de pouvoir indiquer à chaque moment l'énergie restante de la batterie. Elle est l'équivalent de la jauge d'un réservoir de carburant. Autant la quantité de carburant restant dans un réservoir peut être mesurée facilement, autant l'évaluation du SOC ne l'est pas. L'état de charge se définit par le rapport entre la capacité nominale et la capacité restante : $SOC = C_{restant}/C_{nominal}$. Il est donc possible d'évaluer le SOC en comparant la charge nominale avec la charge utilisée : $SOC = 1 - C_{utilise}/C_{nominal}$. Cela demande une mesure et intégration continue de la charge utilisée à partir d'un point de départ. Ceci n'est pas aussi évident, car les deux actions peuvent être biaisées par des difficultés de mesure. Il existe néanmoins un lien monotone entre la tension de circuit ouvert et l'état de charge, fonctionnant uniquement quand la batterie n'était pas utilisée pendant plusieurs minutes (parfois même heures). De plus, la tension de circuit ouvert est également influencée par des paramètres comme la température ou l'âge de la cellule.

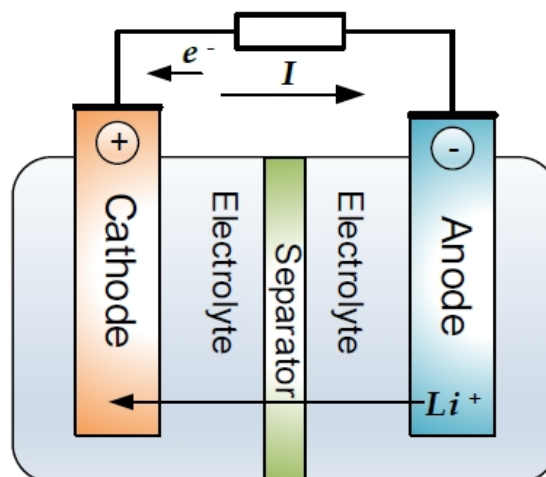


FIGURE 5.11 – Structure d'un élément électrochimique (en décharge) [These Schlasza]

En réalité, la mesure de l'état de charge n'est pas évidente. Actuellement, on utilise une combinaison des deux approches présentées, mais la recherche essaie de trouver un moyen plus rapide et plus fiable d'évaluation du SOC [134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145].

Dans le monde des transports, différents types de batterie ont été utilisés, les plus répandus sont les suivants :

- **Batterie au Plomb** : La batterie au plomb est la batterie la plus utilisée dans le monde du transport. Elle est présente dans presque tous les véhicules, assure le démarrage et agit comme tampon pour l'énergie fournie par l'alternateur. Ce type de batterie est utilisée depuis le début des voitures il y a plus de cent ans. Par contre, elles ne se prêtent pas bien comme batterie de propulsion, car elles ont un nombre de cycles de décharge/recharge limité et leur capacité est généralement faible et diminue avec des températures très basses.
- **Batterie au Nickel Hydrure** : Dans des années 1990, les batteries à base de nickel métal hydrure sont apparues sur le marché, elles ont offert une capacité d'énergie intéressante pour des prix raisonnables. Elles n'ont néanmoins pas pu s'imposer à cause de leurs tensions à circuit ouvert faibles, le fait qu'elles se déchargent toutes seules de 2% chaque jour et le fait qu'elles aient un effet mémoire qui nécessite que les cellules soient à chaque fois complètement vidées avant de pouvoir être rechargées.
- **Batteries Lithium-ion** : Les batteries basées sur Lithium-ion sont en ce moment les plus répandues pour la propulsion. La cause principale de ce succès est la haute tension à circuit ouvert d'environ 3,7V, qui leur donne une haute densité énergétique. Malheureusement, le prix de ces batteries est élevé malgré un développement récent prometteur. Au début, des soucis de sécurité étaient identifiés. Il existait notamment un risque d'emballement thermique (thermal runaway) : un échauffement non contrôlable jusqu'à auto-inflammation des batteries. Aujourd'hui ce risque est géré grâce à l'utilisation de composants adaptés et d'électrolytes qui deviennent isolants à des températures élevées.

Il existe des pistes de développement pour des batteries à base de Lithium, par exemple, en utilisant un électrolyte sec afin d'améliorer la durée de vie comme pour les voitures du système autolib à Paris conçues par Bolloré. Une autre piste de développement est l'utilisation des batteries Lithium-air, qui utilisent l'oxygène de l'air comme un des réactifs. Même si cette configuration promet des densités d'énergie très intéressantes, elle est encore loin d'une application industrielle.

5.3.2/ CONTEXTE DES ÉTUDES DES BATTERIES LITHIUM-ION POUR VÉHICULES ÉLECTRIQUES ET HYBRIDES

Les batteries sont momentanément la composante qui limite le développement des véhicules électriques et hybrides, imputable à leur prix et à leur capacité d'énergie limitée (190 Wh/kg [14] vs. 13 000 Wh/kg pour l'essence). Cette dernière demande une grande quantité de batteries qui entraîne un poids et un coût considérable. Ceci limite considérablement l'introduction des véhicules électriques, qui restent pour l'instant principalement dans la gamme des véhicules de luxe (Tesla S). Un développement des véhicules électriques nécessite donc une réduction des prix des batteries.

Parmi les différentes technologies, les batteries du type Lithium-ion (y compris tous les types de batteries comme LiFePO₄ ou Lithium polymère etc.) sont les plus prometteuses

avec une densité énergétique intéressante. Cependant, les batteries de type Lithium-ion sont relativement sensibles aux conditions d'emploi et pour une utilisation fiable et de longue durée il y a deux approches possibles : soit on utilise seulement une petite partie de l'énergie théoriquement disponible à l'intérieur de la batterie, ce qui accentue la problématique du poids et du coût, soit on acquiert une connaissance détaillée des phénomènes à l'intérieur de la batterie pour l'utiliser au mieux.

Le choix d'étudier le fonctionnement des batteries en détail est fait ici. Comme cette thématique est largement traitée par différents laboratoires en France, Allemagne et dans le reste du monde en ce moment, l'étude se focalise sur des points précis. L'utilisation du véhicule Noao a relevé la sensibilité des batteries aux températures de fonctionnement, particulièrement quand plusieurs packs de batterie sont connectés en parallèle. Basée sur cette découverte, une étude du comportement thermique a été effectuée au sein d'une thèse de doctorat. De plus, une partie des outils de diagnostic développés pour les piles à combustible peut être appliquée sur les batteries et donne la possibilité de coopérations avec d'autres laboratoires.

5.3.3/ ÉTUDE DU COMPORTEMENT THERMIQUE DE LA BATTERIE LITHIUM-ION POUR VÉHICULES ÉLECTRIQUES ET HYBRIDES

L'objectif principal de la thèse de doctorat de Zul Hilmi CHE DAUD (paragraphe 7.1.1.3) est d'étudier le comportement thermique des cellules de batterie Lithium-ion dans le pack à la fois par un travail expérimental et une modélisation électro-thermique. La partie théorique se concentre sur le développement et la validation de modèles électro-thermique 3D de plusieurs cellules de batterie au Lithium-ion. L'étude expérimentale est axée sur l'analyse de la distribution de température en différents endroits de la surface de la cellule, l'impact de l'état de décharge, l'impact de différents taux de décharges constants, et également l'importance du système de refroidissement (convection forcée avec différentes vitesses de l'air de refroidissement) sur la température de la surface de la cellule de batterie. En outre, une étude approfondie est menée afin d'évaluer le comportement thermique de la batterie utilisée dans le véhicule électrique pour compléter des cycles de conduite.

5.3.3.1/ ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

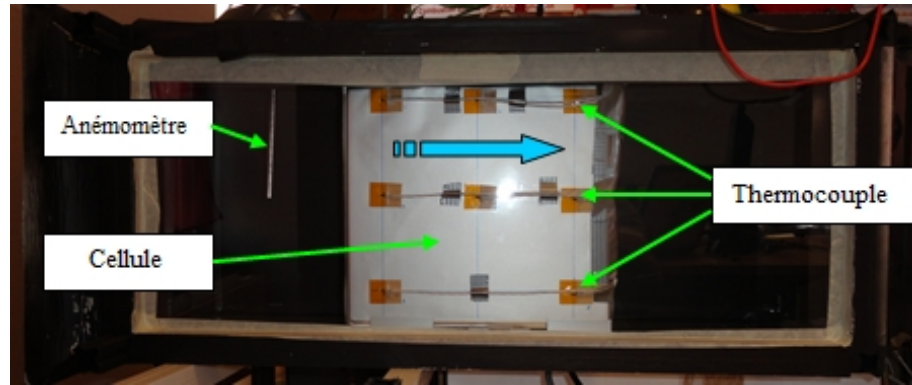
D'après les résultats expérimentaux, obtenus grâce à un dispositif développé sur place avec une connexion de trois cellules Kokam SLPB 100216216H 40 A · h en série (Figure 5.12), on peut conclure que la température de la surface de la cellule est non-homogène, avec une différence de température significative. On constate que les températures les plus élevées se situent à proximité des électrodes et particulièrement sur l'électrode positive (Figure 5.13). Le taux de décharge de la batterie a une influence considérable sur son comportement thermique. Les taux les plus élevés signifient qu'une plus grande quantité de courant circule à l'intérieur de la cellule, ce qui génère plus de chaleur et par conséquent une élévation de la température (Figure 5.14). Par exemple, à une vitesse de l'air de refroidissement constante à $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, la température maximale de la première cellule P1 augmente de $25,2^\circ\text{C}$, $33,3^\circ\text{C}$, $43,6^\circ\text{C}$ avec un taux de décharge respectivement de 1C (1C équivalent à 40 A), 3C, 5C.

Le système de refroidissement joue un rôle important dans le contrôle de la température

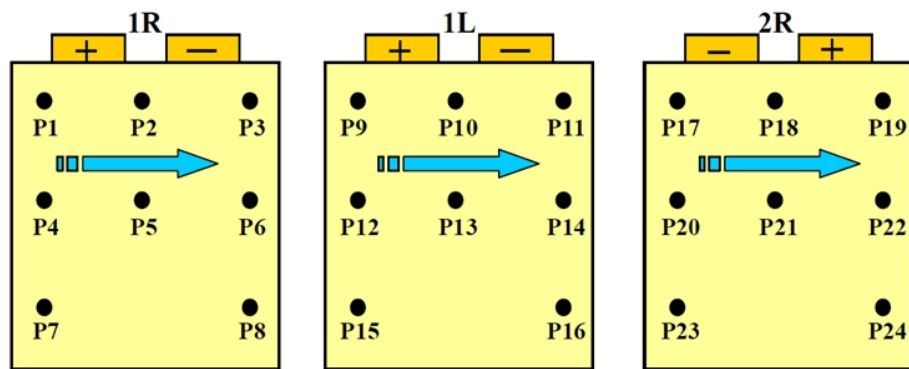
de la cellule de batterie. Dans cette étude, la température maximale de surface de la cellule est réduite de $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ avec une vitesse de l'air à $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ au lieu de $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Figure 5.15). En outre, une vitesse de l'air de refroidissement plus élevée permet également de diminuer la variation de température de la surface de la cellule. À $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, la différence maximale de température entre P1 et P7 est de $11,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, cette valeur diminue à $4,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ en utilisant une vitesse de l'air de refroidissement de $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

La décharge excessive de la batterie avec un SOC inférieur à 20% révèle une augmentation soudaine de la température à tous les endroits de la batterie. La Figure 5.16 montre la variation de la température pour une décharge à 5C. On l'observe pour des SOC supérieur à 20% dans la zone I et dans la zone II après la fin de décharge. Entre les deux zones, il y a la décharge de la batterie avec un SOC inférieur à 20%. On constate une augmentation de température d'environ $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en 100 s.

Cette situation est directement influencée par la variation de la valeur de la résistance interne à différent SOC. Les expériences montrent qu'à une température constante, la variation de la résistance interne avec un SOC entre 100% à 20% est faible. Cependant, en dessous de 20% il y a un saut brusque de la valeur de la résistance interne passant de $2,83\text{ m}\Omega$ par cellule pour un SOC à 20% à $3,6\text{ m}\Omega$ par cellule pour un SOC à 5% [146]. D'autre part, la résistance interne de la batterie est fortement influencée par la température [147, 148, 149, 150, 151]. Dans la présente étude, la résistance diminue de près de la moitié de sa valeur initiale (de $2,17\text{ m}\Omega$ à $1,33\text{ m}\Omega$) quand la température augmente de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.



(a) vue globale



(b) points de mesure

FIGURE 5.12 – Dispositif expérimental d’essai de cellules Kokam SLPB 100216216H

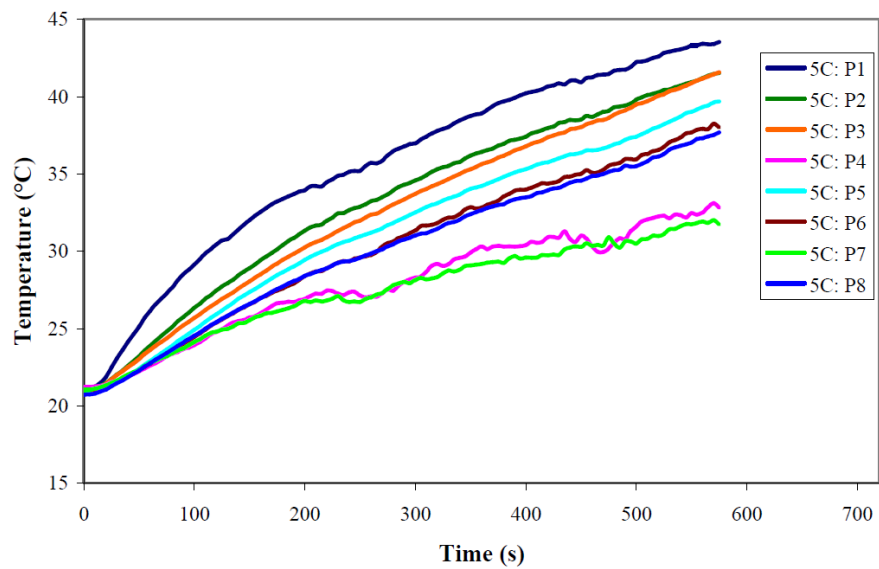


FIGURE 5.13 – Température sur la surface d’une cellule de batterie

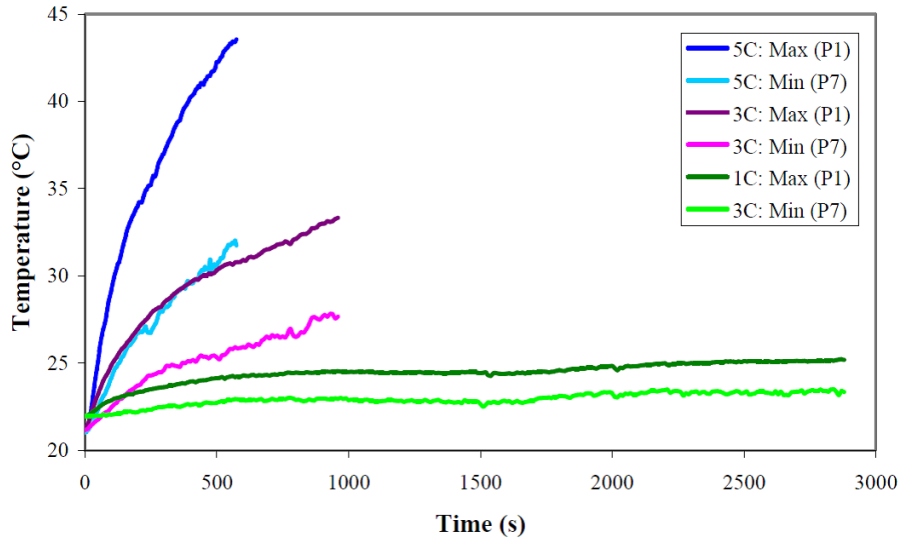


FIGURE 5.14 – Température la plus chaude et la plus froide sur une cellule de batterie à différents taux de recharge

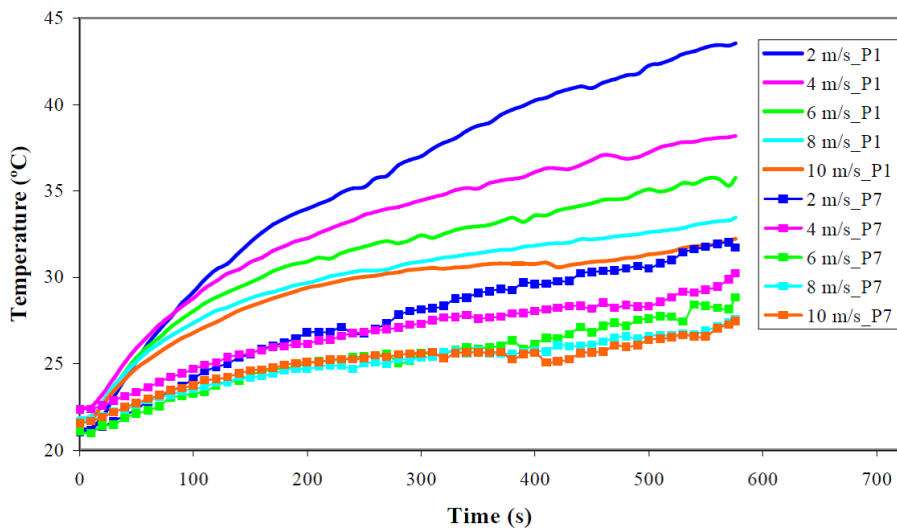


FIGURE 5.15 – Température la plus chaude et la plus froide sur une cellule de batterie à différentes vitesses d'air

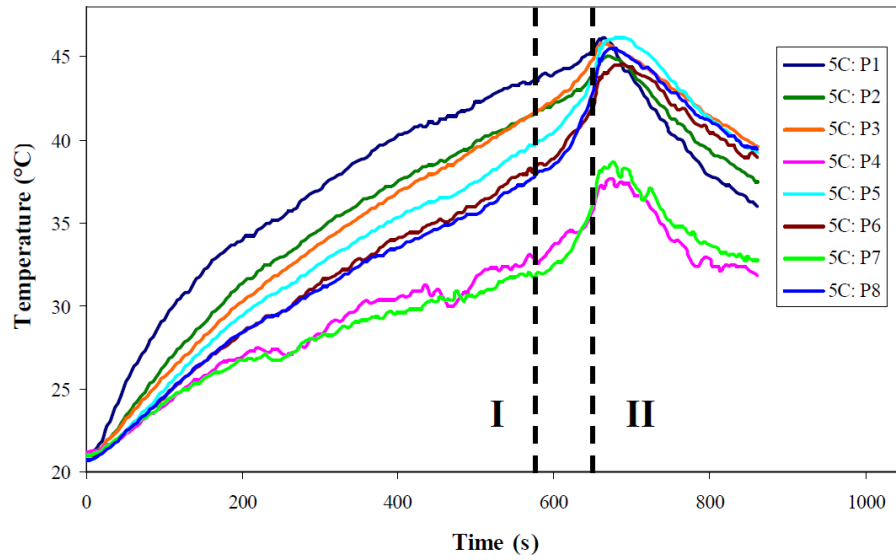


FIGURE 5.16 – Température à une décharge excessive de la batterie avec un SOC inférieur à 20%

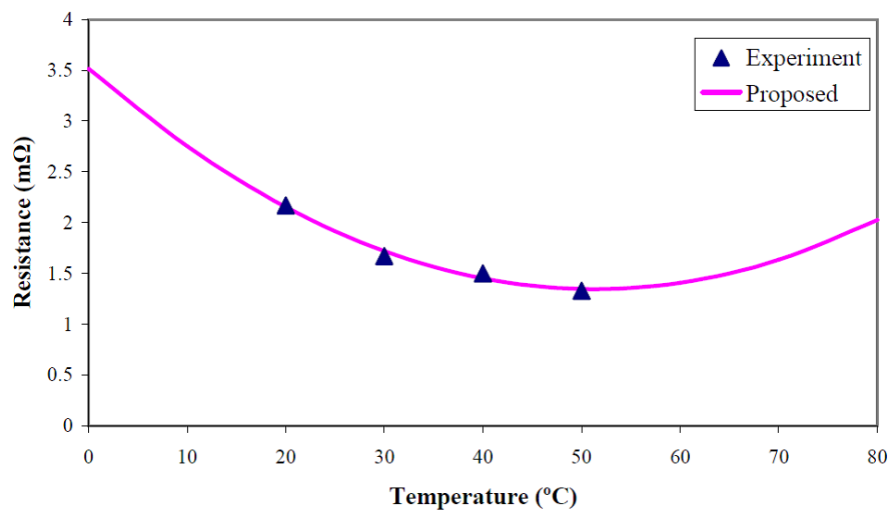


FIGURE 5.17 – Variation de la résistance interne en fonction de la température

5.3.3.2/ MODÉLISATION ÉLECTRO-THERMIQUE

La deuxième partie du travail présenté dans la thèse consiste de la modélisation électro-thermique de batterie grâce au logiciel OpenFOAM. Le modèle considère la génération de chaleur due au courant et à la résistance interne de la batterie, le transfert de chaleur à l'intérieur de la cellule de batterie par conduction et le transfert de chaleur des cellules de batterie à l'environnement par convection forcée et rayonnement. Le modèle propose d'utiliser la résistance interne de la batterie en fonction de la température en accord avec les résultats acquis expérimentalement. La source de chaleur calculée est introduite dans la cellule par deux plaques minces situées au niveau des électrodes positives et négatives dans la partie supérieure de la cellule de batterie. Ensuite, la chaleur de ces plaques est transférée à la cellule entière par le processus de conduction, avant de se dissiper dans l'environnement par le rayonnement et le transfert de chaleur par convection forcée.

Le modèle est validé en comparant les résultats expérimentaux à travers deux aspects principaux ; comportement d'écoulement d'air à proximité de la surface de cellule à différentes vitesses initiales d'air de refroidissement et les évolutions de la température de la batterie à divers endroits de la surface de la cellule sous différents taux de décharge et différentes conditions de convection forcées.

La comparaison du modèle OpenFOAM et des résultats expérimentaux de vélocimétrie par images de particules (PIV) dans la présente étude montre que le modèle est capable de produire de bons résultats de caractéristiques de champ d'écoulement de l'air à l'intérieur du boîtier de batterie à proximité de la surface de la cellule, pour différentes vitesses initiales de l'air. En termes de comportement thermique, une bonne concordance entre les résultats prédits par la simulation et les résultats expérimentaux acquis est obtenue. Les résultats des simulations confirment les observations faites à partir des résultats expérimentaux, notamment que la température est plus élevée près des connecteurs (Figure 5.18) et qu'il existe un lien fort entre le taux de décharge et l'augmentation de la température.

Le modèle permet de prédire la température à des endroits différents sur une surface de la cellule et pour les différentes cellules. En plus, le modèle proposé est capable de simuler l'effet de différentes vitesses de l'air de refroidissement sur les températures de surface de la cellule (Figure 5.19). De bons résultats sont également obtenus pour la température de la surface de la cellule près des électrodes positives et négatives. Une légère différence entre les résultats calculés et expérimentaux peut être observée pour la température de la surface de la cellule de batterie éloignée des électrodes près de l'endroit de la plus basse température. Ceci est visible principalement au début du processus de décharge, puis de bons résultats sont atteints vers la fin.

Le modèle est capable de prédire l'effet de l'empilage des cellules de batterie à l'intérieur de la boîte de la batterie. Malgré cela, ils existent certaines différences entre l'expérience et la simulation pour la cellule du milieu (seconde cellule), le modèle prédit une température légèrement inférieure à celle obtenue par l'expérience.

En général, la différence entre le résultat prédit par le modèle et le résultat d'expérience peut être décrite comme étant la différence des conditions aux limites entre le modèle et l'expérience. Dans le modèle, la valeur de la vitesse de l'air de refroidissement et la température au début de la section d'amont ($X=0$ mm) sont constantes, alors que dans l'expérience ces valeurs varient légèrement. Un autre facteur qui contribue à la différence de résultats est la manière dont les sources de chaleur sont introduites dans le modèle proposé ; elles le sont par des plaques au niveau des électrodes, en réalité la chaleur est

créée partout à l'intérieur de la cellule. L'utilisation de thermocouples dans l'expérience perturbe légèrement l'écoulement d'air à proximité de la surface de la cellule et de plus le canal d'air dans le travail expérimental n'est pas pris en compte dans la modélisation.

5.3.3.3/ CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES DE MODÉLISATION ÉLECTRO-THERMIQUE

En conclusion, le modèle électro-thermique proposé dans cette étude est capable de prédire le comportement de température de surface de la cellule et les caractéristiques de débit d'air à proximité de la surface des cellules avec une bonne précision. En outre, ce modèle, qui est relativement simple, utilise une source de calcul raisonnable pour obtenir de bons résultats. Ce modèle électro-thermique qui est développé dans un logiciel gratuit avec code source ouvert (OpenFOAM) est facile d'accès, et peut être manipulé et utilisé par d'autres chercheurs pour une analyse plus approfondie de la cellule de la batterie [152].

Dans la continuité des travaux présentés dans cette thèse, il est d'abord suggéré que l'étude expérimentale soit effectuée en utilisant un plus grand nombre de cellules de batterie et en variant les espaces entre les cellules. Ceci permet de mieux comprendre l'effet de l'empilage des cellules, et le comportement thermique en fonction des distances entre les cellules dans le boîtier de la batterie. Ces résultats peuvent ensuite être utilisés pour valider le modèle électro-thermique en OpenFOAM. De cette façon, la capacité du modèle pour prédire le comportement thermique des cellules de la batterie à divers aspects est confirmée. L'objectif est que, dans l'avenir, le modèle proposé puisse être utilisé pour prédire le comportement thermique de la cellule de batterie, pour toutes les configurations possibles de la batterie.

Pour l'avenir, il serait également important d'améliorer la représentation de la production de chaleur à l'intérieur de la cellule de la batterie dans le modèle électro-thermique. La première approche utilisée la modélisait sous forme de plaques minces attachées au sommet des électrodes positives et négatives. Cette approche présente des faiblesses, notamment pour les endroits éloignés de cette source de chaleur qui sont calculés par le modèle de façon moins précise, en particulier au début du processus de décharge. Pour la suite, en plus du procédé actuel, il est proposé de créer à l'intérieur de la cellule de batterie une surface mince à utiliser comme source de chaleur et placé au milieu de la cellule pour couvrir toute la longueur et la hauteur de celle-ci. En utilisant ce procédé, une meilleure répartition de la chaleur à tous les endroits de la cellule serait obtenue.

En continuité avec les travaux en cours, il est conseillé d'améliorer la valeur de la résistance interne utilisée dans le modèle électro-thermique, pour des résultats plus précis. Dans la présente étude, la résistance interne de la batterie utilisée est basée sur le résultat expérimental. C'est une courbe polynomiale qui correspond le mieux au résultat expérimental. En utilisant cette résistance, le modèle a tendance à prédire une température légèrement supérieure (aux endroits proches de la source de chaleur), en particulier au début du processus de décharge, où la température est relativement faible et la valeur de la résistance interne est donc élevée. Dans le futur, l'amélioration de la valeur de la résistance interne sur la base d'expériences étendues doit intégrer à la fois l'aspect de la température et du SOC. L'application de la résistance interne calculée par cette méthode peut conduire à une meilleure prédiction de température de la surface cellulaire.

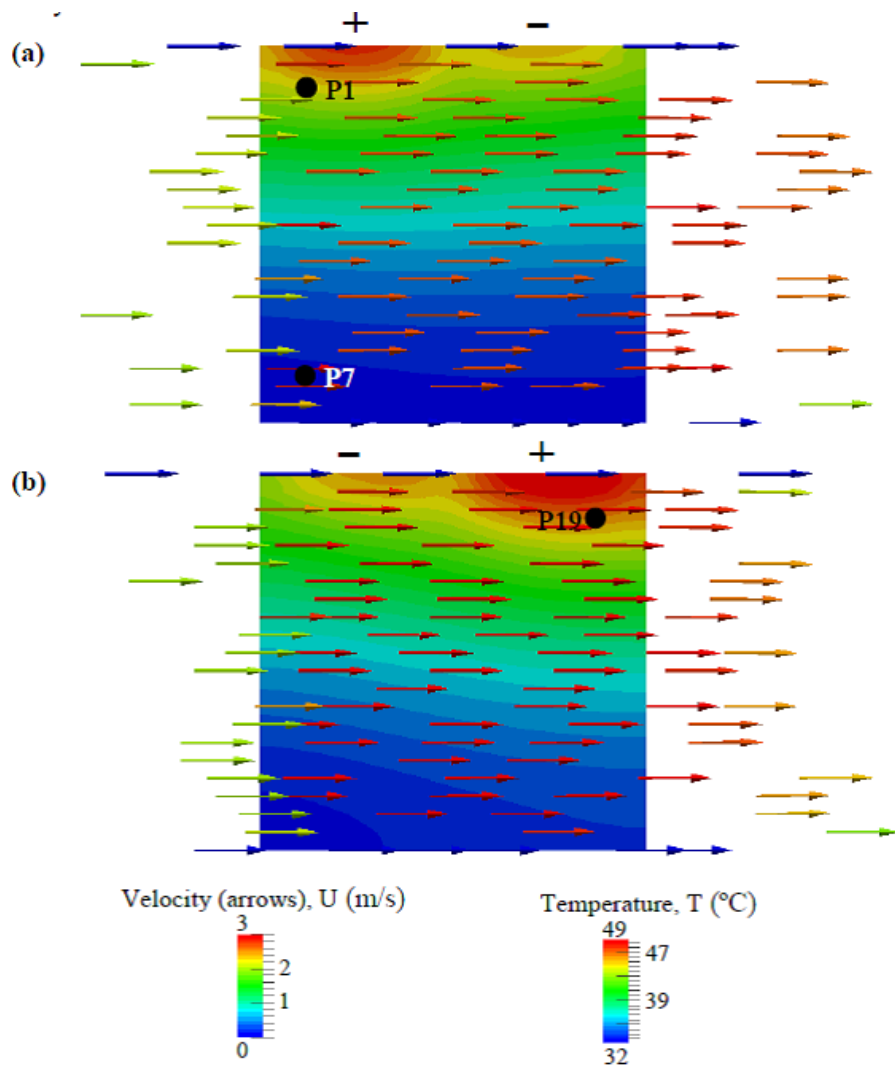


FIGURE 5.18 – Température de la surface de batterie et champ d'écoulement de l'air pour (a) la première cellule et (b) la seconde cellule.

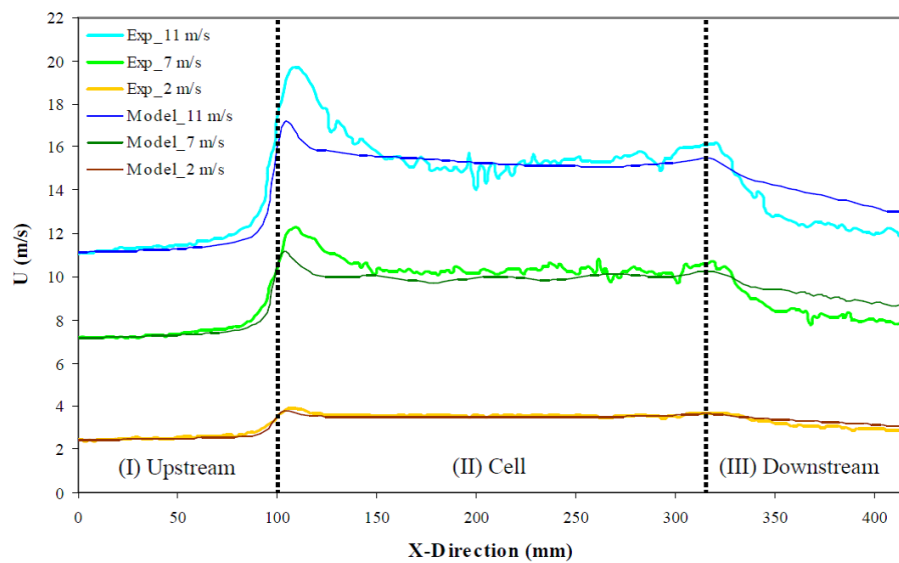


FIGURE 5.19 – La vitesse d'écoulement de l'air dans le plan b (près de la surface 1R) pour faible, moyenne, et grande vitesse.

5.3.4/ VIEILLISSEMENT DES BATTERIES LITHIUM-ION

Actuellement les batteries du type Lithium-ion sont les éléments de stockage (energy storage system - ESS) les plus prometteurs pour les véhicules électriques et hybrides. Mais comme tout ceux de sa catégorie, ils souffrent du vieillissement. Comme les batteries sont souvent l'élément le plus cher d'un véhicule électrique, il est de plus en plus important de connaître l'état actuel de ce composant et sa durée de vie restante [153]. Chaque batterie de traction est constituée de multiples cellules individuelles, même si elle est souvent considérée comme un seul élément. En général, on peut dire que la cellule la plus faible détermine la performance du système entier. C'est pour cette raison qu'un diagnostic doit établir l'état de santé de chaque cellule.

Dans la suite, différents mécanismes de vieillissement seront présentés en prenant en compte les effets possibles de ces mécanismes sur la performance de la cellule. Le travail sur le vieillissement des batteries présenté est issu de la thèse de doctorat de Christian SCHLASZA (paragraphe section 7.3.1.1) [154]. Cette thèse était effectuée en dehors du laboratoire Drive dans le contexte d'une coopération binationale entre le laboratoire IRTES-SET (maintenant Femto/ST Sharpac), l'Institut für Energie Effiziente Mobilität (IEEM) de la Hochschule Karlsruhe et de Bosch Engineering. J'ai pu co-encadrer cette thèse en tant que chercheur invité à l'IRTES-SET.

5.3.4.1/ VIEILLISSEMENT, DURÉE DE VIE ET DÉFINITION DU SOH

Il faut distinguer le vieillissement calendaire du vieillissement cyclique. En réalité, tous les deux surviennent ensemble, mais il faut noter que les phénomènes de base sont différents. Le vieillissement calendaire survient que la batterie soit utilisée ou pas ; le vieillissement cyclique est associé à l'utilisation de la batterie. Un aspect important du vieillissement calendaire est la température de stockage qui peut l'accélérer [155]. Le vieillissement cyclique est souvent décrit en fonction du nombre de cycles. Cependant, les batteries, surtout dans des véhicules hybrides, font rarement des cycles de charge-décharge complets. Il est donc préférable de décrire le vieillissement cyclique en fonction de l'énergie fournie et reçue.

Pour des applications automobiles, il est habituel de définir la fin de vie (end of life - EOL) quand la capacité atteint 80% de la capacité initiale [140, 156, 157, 158].

Pour caractériser une batterie, il est nécessaire de l'analyser et de quantifier sa condition actuelle. Ceci est habituellement décrit par l'état de santé (state of health - SOH) de la batterie. Le grand nombre des définitions du SOH est un problème pour la science et l'industrie quand on parle du diagnostic des batteries [159, 160]. Les facteurs les plus importants par rapport au SOH sont la capacité et la résistance interne [140, 161, 162]. Ici on distingue les deux phénomènes en utilisant les définitions de SOH suivantes :

SOH_C : En fonction de la capacité

Pour des véhicules électriques, la capacité peut être le facteur le plus déterminant pour définir le SOH [163, 164, 165, 166, 167, 168]. Pour cela la capacité initiale d'une batterie nouvelle est comparée à la capacité actuelle et exprimée en pour cent.

SOH_R : En fonction de l'impédance

Quand on regarde les véhicules hybrides, la capacité n'est pas aussi importante que l'aptitude de la batterie à fournir une puissance donnée au système. Cette aptitude est étroitement liée à la résistance interne ou impédance de la batterie.

Les deux phénomènes ont lieu en même temps et peuvent s'influencer mutuellement, comme présenté en Figure 5.20. Lu et al. ont confirmé dans leur review sur la gestion des batteries lithium ion qu'il n'existe toujours pas une seule définition cohérente pour le SOH dans la science ou l'industrie [159]. Hatzell et al. considèrent la multitude des définitions du SOH comme un des problèmes majeurs en relation avec la détermination de la dégradation des batteries [160].

5.3.4.2/ MÉCANISMES DE VIEILLISSEMENT

La Figure 5.21 montre la structure d'une cellule de batterie Lithium-ion avec une vue d'ensemble des mécanismes de vieillissement.

Les mécanismes et effets de vieillissement indiqués en rouge sont présentés plus en détail. Ces effets sont listés dans le Tableau 5.4 en citant quelques exemples de références. Dans la suite les effets de vieillissement de l'anode sont discutés en détail.

Vieillessement des anodes

- **Corrosion des collecteurs de courant** : La corrosion peut entraîner une perte de contact et donc une augmentation de la résistance de contact [171]. Braithwaite et al. ont montré que le collecteur de courant anodique en cuivre peut subir des craquements influencés par l'environnement [171].
- **Variation dans la morphologie de l'anode** : Il y a deux raisons principales aux variations de morphologie de l'anode :
 - la déstructuration (structural disordering) qui décrit la dégradation de la structure interne des particules de l'anode causée principalement par un stress mécanique. Les raisons de la déstructuration peuvent surtout être les moments de charge, décharge, la variation de la température et des vibrations.
 - les variations morphologiques à la surface des particules en graphite, qui sont principalement reliées à la co-intercalation du solvant [170]. Des réactions secondaires

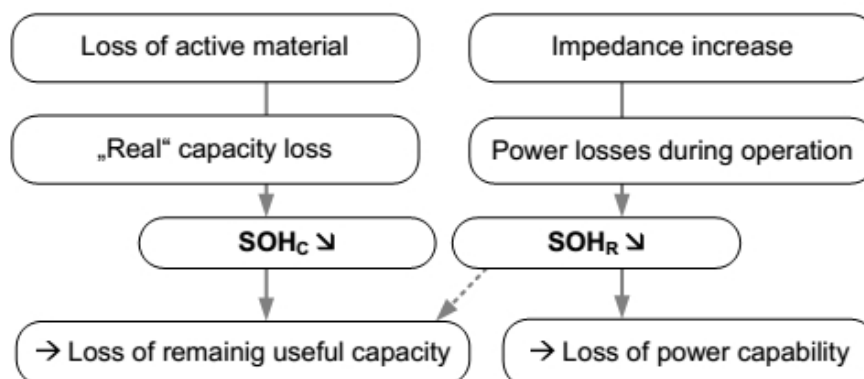


FIGURE 5.20 – Relation entre les deux définitions de SOH

Aging mechanisms in Li-ion cells

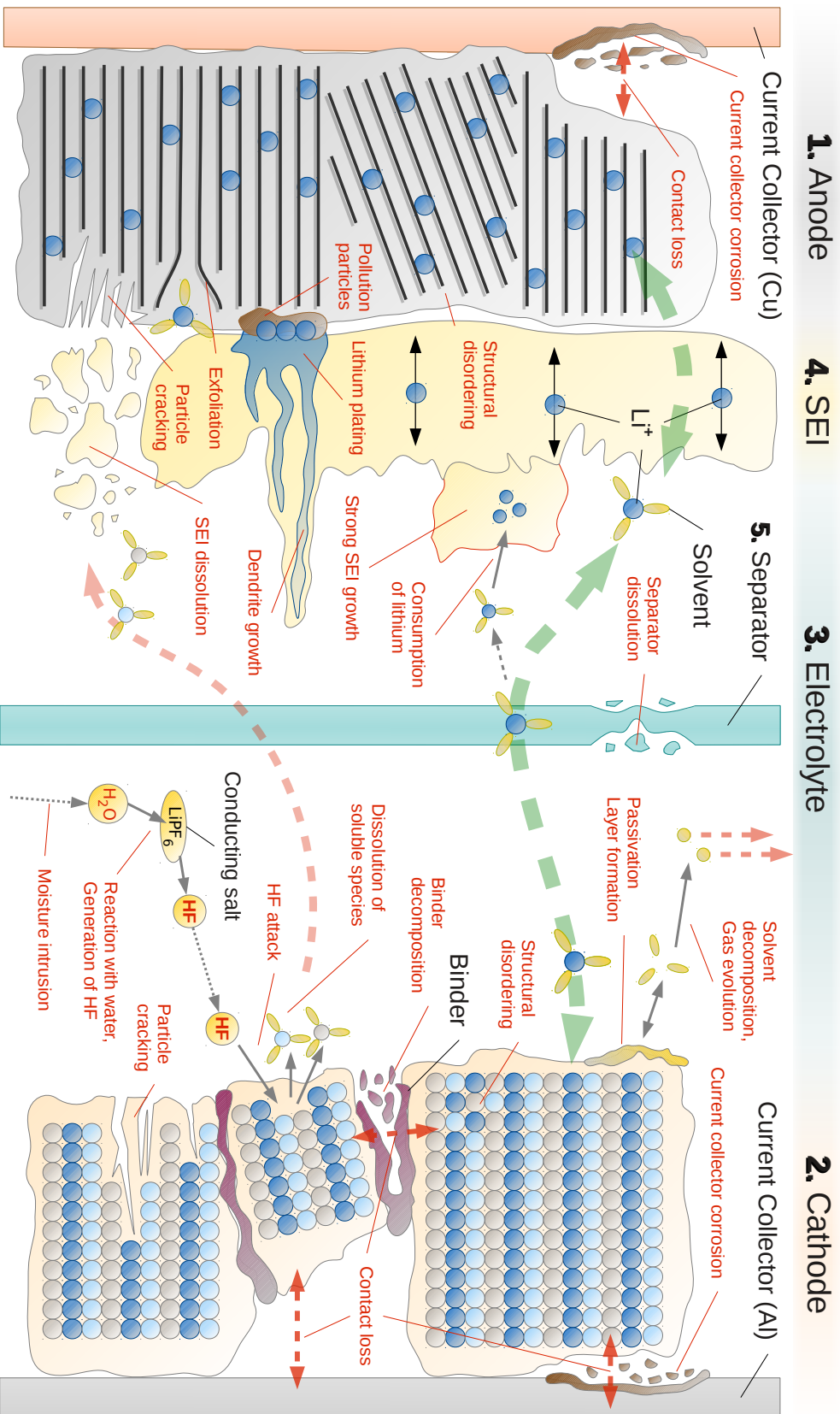


FIGURE 5.21 – Mécanismes principaux de vieillissement d'une cellule de batterie Lithium-ion (extrait de [169, 170])

TABLE 5.4 – Mécanismes de vieillissement dans des cellules de batterie Lithium-ion selon composants

Nr.	Cell component	Failure subgroup	Aging mechanisms and references
1.	Anode	Current collector corrosion Morphological changes Lithium plating	– Environmentally assisted cracking [171] – Change in volume due to charging/discharging [170, 172] – Change of the surface morphology [173] – Formation of lithium deposits [155, 172] – Growth of lithium dendrites [174, 175]
2.	Cathode	Current collector corrosion Morphological changes Decomposition of binder Dissolution of soluble species Moisture intrusion	– Corrosion of Al in combination with LiPF ₆ conducting salt [171, 176] – Change in surface porosity [177, 178] – Binder dissolution [179] – Reaction with HF generated in electrolyte [180, 181, 182] – Reaction of cell materials with water [183, 184]
3.	Electrolyte	Electrolyte decomposition Moisture and formation of HF	– Stability of electrolyte and conduction salt [185, 186] – Reaction of conduction salt with water to HF [170, 187, 155]
4.	SEI-layer	SEI-layer growth SEI-layer decomposition	– Resistive behavior becomes more pronounced [173, 186] – Consumption of lithium [172] – Decomposition due to high temperatures [188]
5.	Separator	Separator destruction	– Separator properties and failure modes [189, 190, 191]

des composants intercalés avec du graphite peuvent désordonner les structures à la surface des particules de graphite [173].

- **Plaqué lithium** : Une situation typique où le plaqué lithium a lieu est lors du passage de forts courants de charge à des températures faibles. Les Li⁺-ions ne peuvent pas s'intercaler assez rapidement dans le matériel de l'anode et des dépôts de lithium sont formés sur la surface en graphite [155, 172].

Une augmentation continue de ces dépôts et la formation de dendrites peuvent détruire la séparation et, au final, causer un court circuit de la cellule, qui est souvent la raison d'un emballement thermique (thermal runaway) [174, 175].

- **Changements dans la couche SEI (Solide Electrolyte Interface)** : Pour les anodes en graphite, une épaisseur du SEI définie est nécessaire afin de protéger la surface de l'anode. Comme présenté dans la Figure 5.21 il y a deux problèmes principaux liés à

celle-ci : sa décomposition et une croissance trop importante de l'épaisseur.

Si l'épaisseur augmente de façon trop importante, la transition des ions Li^+ est retardée. A partir d'un certain seuil, le film devient de plus en plus résistif, ce qui peut être vu comme un effet de vieillissement [186].

Au contraire, une décomposition du SEI est également problématique, comme la fonction protectrice de cette couche est une exigence importante pour la fonctionnalité de la batterie. Chaque défaut dans cette couche de protection mène à une corrosion du lithium et en conséquence, une perte durable d'énergie [188]. Ce phénomène est rencontré particulièrement à des hautes températures (au-dessus de 60°C) et peut entraîner une défaillance de la passivation de l'anode [155].

Vieillessement des cathodes

Cette partie se concentre sur les cathodes en LiFePO_4 , comme détaillé par Wu et al. [187].

Les aspects principaux à étudier sont la corrosion du collecteur de courant (Al) vulnérable à l'oxydation particulièrement en combinaison avec des sels qui conduisent le LiPF_6 [176]. Les changements de morphologie de la cathode qui entraînent des modifications importantes de la surface en comparaison à des cathodes nouvelles. La décomposition de la colle, particulièrement après des tests de durée de vie accélérée et à l'intérieur des cellules [179]. La dissolution des espèces solubles, quand le fer contenu dans le matériel de la cathode peut être séparé du FePO_4 , il transite dans un autre état et est dissous dans l'électrolyte. L'humidité, même si LiFePO_4 est en général fortement stable à l'air et à l'eau, il y a des expériences qui montrent une dégradation de performance de la cellule après quelques semaines d'exposition à ces deux réactants [184].

Vieillessement de l'électrolyte et de la séparation

L'électrolyte sert comme conducteur d'ions tout en garantissant une isolation électrique. Il y a plusieurs groupes d'électrolyte : les électrolytes organiques, les électrolytes solides et les électrolytes liquides ioniques [186]. Les cellules commercialisées utilisent exclusivement des électrolytes organiques en utilisant comme sel conduisant LiPF_6 [186]. Les autres types, souffrant d'une faible conduction ionique, ne seront pas évoqués.

De nombreuses recherches ont été effectuées afin de développer l'électrolyte organique le plus adéquat. Cependant, la stabilité thermique - un élément particulièrement important pour la sécurité - n'atteint pas encore les exigences requises pour une application dans les VEs et VHEs.

Vieillessement de composants extérieurs à la cellule

Les composants extérieurs à la cellule jouent également un rôle important dans le vieillissement des batteries. La structure de la cellule, avec son entourage métallique, est présentée en Figure 5.22. Les effets du vieillissement, en relation avec ces composants, sont également présentés.

5.3.4.3/ CLASSIFICATION DES MÉCANISMES DE VIEILLESSEMENT AVEC FMEA

La méthode Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) était développée dans les années 1960 comme outil pour étudier les modes de défauts qui peuvent arriver dans des

systèmes complexes. Cette méthode identifie des défauts connus ou potentiels dans un système et aide donc à les éliminer. Souvent la FMEA est utilisé en combinaison avec le Risk Priority Number (RPN) qui est défini comme coût de l'événement en multipliant la gravité, la probabilité et la facilité de détection. Ces méthodes aident donc à classifier les défauts afin d'identifier les défauts à traiter en priorité. Elle est largement utilisée dans l'industrie, par exemple dans l'aéronautique, automobile ou électronique.

Dans le contexte des batteries Lithium-ion, la méthode est utilisée afin d'analyser le processus électro-chimique au lieu d'analyser le processus industriel. L'objectif est d'identifier les défauts qui doivent être surveillés en priorité.

L'analyse des résultats montre que des défauts avec le plus grand RPN peuvent provenir des différentes parties de la batterie, comme la connexion, l'anode, la cathode ou le séparateur. Il n'existe donc pas un seul endroit de la batterie qui est plus fragile qu'un autre, Figure 5.23.

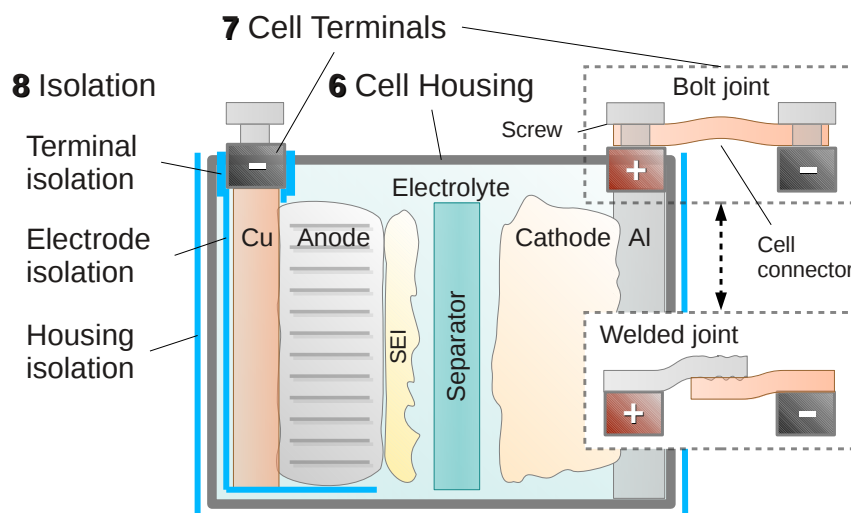


FIGURE 5.22 – Cell structure including exterior cell components

ID	Failure Subgroup	Component	Function	Failure analysis		Effects analysis		FMEA	
				Failure Mode	Failure Cause	Local Effect	System Effect	Severity	RPN
1.1.1	Current collector corrosion	Negative current collector (Cu)	Electrical connection of electrode material with cell terminals	Corrosion (dominant: environmentally assisted cracking [19])	Water intrusion or inclusion of water during cell production	Contact loss between current collector and graphite particles	Increase in inner resistance → SOH _R ↓	6	120
1.1.2	Current collector corrosion	Negative current collector (Cu)	Electrical connection of electrode material with cell terminals	Corrosion (dominant: environmentally assisted cracking [19])	Water intrusion or inclusion of water during cell production	Passivation of active electrode material (graphite particles) [19]	Increase in inner resistance → SOH _R ↓	5	75
1.2.1	Morphological changes	Graphite particle	Intercalation of Li-ions	Structural disordering	Mechanical stress due to: Charging / Discharging over many cycles	Change in volume due to (de-)intercalation of Li causes mechanical stress. This slightly changes the internal crystal structure of the graphite [20]	Intercalation capability of the graphite particles decreases → SOH _C ↓	4	96
1.3.1	Lithium plating	Anode surface	Permeability to Li-ions	Lithium agglomeration on anode surface	Charging at high currents and low temperatures: Li-ions cannot intercalate fast enough into anode and form deposits on the graphite surface. Amplified by: pollution of graphite surface or very thick SEI-layer [2, 20]	Formation of lithium deposits on the anode surface Consumption of cyclable lithium	Increase in inner resistance → SOH _R ↓ Loss of lithium → SOH _C ↓	7	126

FIGURE 5.23 – Résultats de le FMEA pour une batterie Lithium-ion [154]

5.4/ PILE À COMBUSTIBLE

Un autre composant intéressant dans le milieu des véhicules hybrides est la pile à combustible, fonctionnant avec de l'hydrogène si possible extrait de sources renouvelables, pouvant à terme remplacer les moteurs à combustion interne.

La conception de cellules et systèmes pile à combustible est étudiée dans des laboratoires spécialisés (par exemple FCLAB). Même si ces laboratoires ont des connaissances considérables dans le domaine des piles à combustibles, il peut être pertinent d'aborder la problématique par son intégration dans de véhicule. Pour l'aspect énergétique, les questions sont : quels sont les délais de réaction d'une pile à combustible et comment peut-on fournir la différence d'énergie. Les réponses menant naturellement vers des systèmes hybrides et l'analyse des besoins énergétiques.

Un autre aspect est l'intégration dans le système thermique. Les piles à combustible nécessitent un refroidissement mais aussi, en cas de températures faibles, un apport d'énergie. La plage des températures utilisée est comparable aux températures rencontrées dans les batteries de type Lithium-ion, mais les flux d'énergie sont différents. Pour terminer, l'intégration mécanique dans le véhicule engendre des études vibratoires.

Pour toutes les questions présentées, une bonne modélisation du comportement multi-physique d'une pile à combustible doit être disponible. Une telle modélisation a été développée, entre autres, par Gao et al. [192], pour un type de pile à combustible. Durant le stage de master de Raaj Ganesh SAMIKANNU RAMESH (paragraphe 7.1.2.3) le modèle multi-physique a été re-paramétré pour décrire le fonctionnement d'une pile à combustible de type Bahia [193] disponible au laboratoire Drive. Ce système était testé à différents points de fonctionnement (courant, température, stœchiométrie). Grâce aux descriptions et aux mesures effectuées, de nombreuses informations sur le système étaient disponible, mais ne correspondait pas forcément à celles demandées par le modèle initial (40 paramètres du système, 20 conditions de fonctionnement). Pour cela, une étude de la sensibilité, en utilisant l'approche Multi-Parametric Sensitivity Analysis (MPSA) [194, 195, 196], du modèle en fonction des paramètres à été effectuée. L'identification de la sensibilité des paramètres suit la procédure suivante :

1. Choix des paramètres à analyser ; *40 paramètres sont sélectionnés.*
2. Choix du domaine pour tous les paramètres ; *$\pm 30\%$ autour de la valeur de référence.*
3. Pour chaque paramètre sélectionné une série de 500 points d'itération est choisie.
4. Faire tourner le modèle 500 fois avec les 500 valeurs d'itération pour chaque paramètre et évaluer la fonction correspondante en utilisant (Equ. 5.37).
5. Évaluer le critère de sensibilité relative à différentes valeurs de courant en utilisant (Equ. 5.38).
6. Évaluer la valeur de l'index de sensibilité de chaque paramètre en utilisant (Equ. 5.39).

TABLE 5.5 – Sensibilité des paramètres du modèle de Gao [192]

Rank	Parameter (System property)	Sensitivity Index
1	Membrane Section Area	1416.318
2	Membrane Dry Density	476.1759
3	Membrane Thickness	223.0769
4	Membrane Equivalent Mass	77.4765
5	Catalyst Section Area	10.0850
6	GDL Porosity	9.7113
7	GDL Tortuosity	9.0120
8	GDL Section Area	6.2642
9	GDL Thickness	5.8449
10	Cathode Channel Thickness	5.2944
11	Cathode Channel Fluid Section Area	2.8557
12	Cathode Channel Length	1.8520
13	Bipolar Plate Solid Density	1.0434
14	Bipolar Plate Solid C_p	1.0434
15	Cathode Channel Number	0.4526
16	Cooling Channel Solid Section Area	0.3809
17	Cooling Channel Thickness	0.3374
18	GDL Solid Density	0.3107
19	GDL Solid C_p	0.3107
20	Anode Support Thickness	0.3082

$$f(i) = \sum_{k=1}^{500} (V_{cell(i),typical} - V_{cell,(i)(k)})^2 \quad (5.37)$$

$$\Phi_i = \frac{f(i)}{V_{cell(i),typical}} \quad (5.38)$$

$$\vartheta = \sum_{i=0}^{imax} \Phi_i \quad (5.39)$$

Les résultats montrent que les paramètres qui ont la plus grande influence sur le système sont quatre paramètres liés à la membrane, (Tableau 5.5). Ceci a permis de savoir lesquels caractériser avec précision et lesquels estimer. La Figure 5.24 montre que l'adaptation des paramètres a permis d'obtenir une bonne description de la courbe de polarisation à vide. La suite des travaux montre qu'il faut considérer la température du système avec plus de précision.

Si une pile à combustible est prévue comme source d'énergie dans un véhicule hybride, il peut également être utile d'étudier la technologie des piles à combustibles HTPEM (High Temperature Proton Exchange Membrane). Elles travaillent à des températures d'environ 180 °C qui facilitent l'utilisation des gaz reformés, le refroidissement et la valorisation de la chaleur, mais nécessitent un préchauffage qui rend le démarrage plus long [197].

Un dispositif de HTPEM est disponible au laboratoire DRIVE (FABER El-Hassane Aglizim).

Les piles à combustible et les batteries sont toutes deux basées sur des réactions électrochimiques. Il n'est donc pas surprenant que certaines méthodes de diagnostic puissent

être appliquées aussi bien sur l'une que sur l'autre. Comme, par exemple, le diagnostic basé sur la spectroscopie d'impédance qui est particulièrement adapté pour analyser les effets du vieillissement sur les cellules. En vue d'une prévision du comportement des cellules pile à combustible, l'impact de leur vieillissement accéléré a été étudié dans le contexte d'un projet région géré par FCLAB avec la contribution du DRIVE [198]. Ce projet a permis d'échanger nos connaissances sur les cycles de vieillissement accéléré appliqués aux piles à combustible et de les comparer avec des activités semblables dans le domaine des batteries.

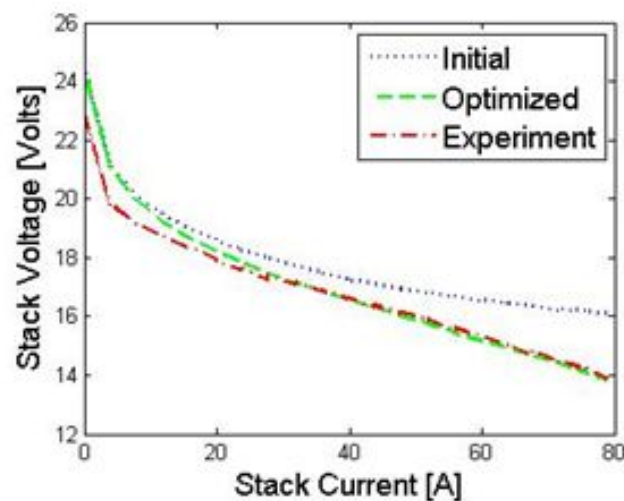


FIGURE 5.24 – Modélisation et amélioration des paramètres

VALORISATION DES REJETS THERMIQUES

La demande d'énergie propre et bon marché est en constante augmentation. Désormais, il existe un fort besoin de produire de l'énergie mécanique à des endroits définis. Pour l'instant, les types de machine prédominants de production d'énergie en point, sont les machines à combustion basées sur les cylindres dans les automobiles, les turbines à gaz et les machines à vapeur dans les centrales thermiques. À cause de leur processus thermodynamique, elles rejettent des gaz chauds et nécessitent un refroidissement. D'une façon générale, cette chaleur est dissipée dans l'atmosphère et l'énergie qu'elle contient est perdue. C'est pourquoi, une étude a été effectuée sur les moteurs à apport de chaleur externe dont l'énergie primaire est de l'énergie thermique. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux moteurs Stirling dans le contexte de la thèse Cifre de Juliette BERT, qui était effectué en coopération avec Danielason Engineering (paragraphe 7.1.1.1).

L'une des principales caractéristiques du moteur Stirling, qu'il partage avec les autres moteurs à apport de chaleur externe, est le fait qu'il tire son énergie primaire de chaleur qui est produite extérieurement, contrairement à un moteur à combustion interne dont le fonctionnement doit prendre en compte les conditions nécessaires à la combustion. Ceci permet aux moteurs Stirling d'utiliser une multitude de sources de chaleur, comme des gaz d'échappement, la combustion de carburants pétroliers, des gaz inflammables ou des déchets végétaux. Ils sont même capables d'utiliser de l'énergie thermique naturelle comme l'énergie solaire ou la géothermie [199, 200, 201, 202].

L'étude menée au cours de la thèse de Juliette Bert se décompose en trois parties : la modélisation numérique, la validation expérimentale et l'optimisation.

6.1/ MODÈLE NUMÉRIQUE DU MOTEUR STIRLING

Dans un premier temps, un modèle numérique zéro dimension, trois zones en temps fini a été développé. La modélisation se positionne dans la lignée des modèles existants trois zones, isotherme qui a évolué par rapport au volume mort [203, 204] et la description des sources par éléments finis [205, 206]. Ces dernières années, on a vu l'intérêt de la modélisation du moteur Stirling afin d'optimiser ses puissances fournies et/ou des rendements atteints [207, 208, 209, 210, 211, 212].

Le modèle trois zones, tel qu'il a été conçu, prend en compte les échanges thermiques

aux parois en fonction des températures, du temps de contact et des pertes de charge entre les différentes zones (Figure 6.1). Il ne préjuge cependant, ni des dimensions moteur, ni du gaz de travail, ni des conditions de fonctionnement moteur. Une des finalités de ce modèle est de faciliter les études paramétriques du système et la cinématique pour les différents gaz de travail sur une large gamme de pressions de remplissage et températures de sources chaudes. Cela nécessite un modèle assez simple pour tester les différentes combinaisons de paramètres, tout en fournissant des résultats fiables.

Dans ce modèle les volumes chauds V_h et froids V_c sont définis par le déplacement des pistons en fonction de l'angle vilebrequin et peuvent être calculés géométriquement. Le volume du générateur V_r est constant. Il y a donc trois inconnus dans chaque zone (les pressions p_h, p_c, p_r , les masses m_h, m_c, m_r et les températures des gaz T_h, T_c, T_r). De plus, la température du régénérateur T_m doit être considérée comme une inconnue supplémentaire, car elle évolue durant le cycle en fonction de l'échange avec les gaz qui le traversent. Le système d'équations différentielles avec 10 inconnues est ensuite établi d'après la loi des gaz parfaits, la conservation de l'énergie due à la deuxième loi de la thermodynamique, et la conservation des masses, pour les parties froides, chaudes et la zone de régénérateur, ainsi que la conservation des énergies dans la matrice du régénérateur.

Ce système est résolu numériquement utilisant Matlab [213, 214]. Des valeurs initiales sont définies pour les 10 inconnues qui permettent le démarrage à chaud ou à froid.

Un certain nombre de valeurs utilisées dans les équations principales a été calculé dans des sous-fonctions et peut être modifié indépendamment.

La position et la vitesse de chaque piston peuvent être calculées en utilisant le lien mécanique et quelques dimensions géométriques qui influencent les volumes. Les volumes du cylindre et les volumes morts sont donc connus à chaque instant.

L'échange thermique entre gaz et surface détermine le flux d'énergie et son sens. L'échange d'énergie principalement convectif est décrit par la loi de Newton [215], qui dépend de la surface d'échange, de la différence de température entre la surface et le gaz et du coefficient d'échange convectif. Ce dernier découle de la vitesse du moteur, de sa température et de sa pression. Il est calculé en utilisant la corrélation de Colburn [216]. L'inertie thermique des composants est supposée assez grande pour assurer une température constante de la paroi durant le cycle.

Souvent, le transfert de chaleur convectif à l'intérieur du cylindre est décrit par une corrélation du nombre de Nusselt obtenue par des expériences. Une solution intéressante

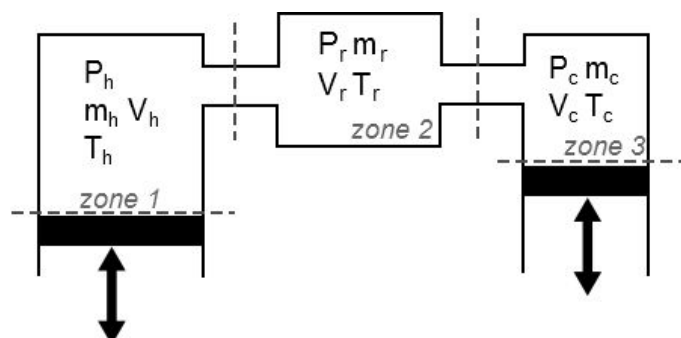


FIGURE 6.1 – Différentes zones du modèle

est présentée par Seghir-Ouali et al. [217].

Un échange de masses a lieu entre la zone froide et le régénérateur et entre la zone chaude et le régénérateur. Des échanges entre les gaz de travail et les environs peuvent également être calculés afin de prendre en compte les pertes éventuelles. Afin de décrire le débit massique entre deux zones, en fonction d'une géométrie donnée, la différence de pressions sur les deux côtés est évaluée en utilisant l'équation de Saint-Venant [218, 219]. Même si elle est le plus souvent utilisée pour décrire les conditions d'entrée/sortie d'une machine à combustion interne [220], elle peut également l'être pour calculer le débit massique.

Afin de renforcer l'approche, les chutes de pression ont été mesurées pour les trois zones du moteur Stirling avec un gaz de travail en utilisant une soufflerie interne. Les résultats ont permis de développer des équations de pertes de pression en fonction de la vitesse de l'air dans chaque zone. Elles ont également été appliquées pour l'hélium comme gaz de travail. Cette simplification est due à une limitation des capacités de mesurer les chutes de pression à l'intérieur du moteur avec de l'hélium. Les résultats expérimentaux montrent que cette simplification engendre des différences entre les résultats expérimentaux et la modélisation. Une des pistes pour améliorer les résultats est donc d'affiner la description de pertes de pression à l'intérieur du moteur Stirling avec l'hélium comme gaz de travail.

Les caractéristiques thermodynamiques des gaz ont été calculées en utilisant les tableaux Janaf [221] ou des approches équivalentes.

6.2/ VALIDATION EXPÉRIMENTALE

Par la suite, une série de mesures expérimentales a été réalisée grâce à deux moteurs Stirling de taille et de puissance différentes (quelques watts pour le premier [216, 222], 1 kW pour le second [223]).

L'installation expérimentale d'un moteur Stirling type gamma d'une puissance de 1 kW est adaptée afin de permettre la mesure de valeurs clés (Figure 6.2). Ensuite l'influence de la variation des paramètres suivants est étudiée :

- gaz de travail (air et hélium),
- pression de remplissage (entre 1 bar absolu pour l'air et 2 bar absolu pour l'hélium et 11 bar absolue pour les deux gaz),
- température de la source chaude (entre 200 °C et 700 °C),
- vitesse de rotation du moteur (entre 200 rpm et 1000 rpm).

Pour toutes les expériences, l'évolution de la température et la pression à l'intérieur de la zone de travail sont mesurées afin d'évaluer la puissance effective.

La comparaison entre résultats expérimentaux et numériques montre un bon accord par rapport à la puissance effective en fonction de la variation de la vitesse (Figure 6.3, Figure 6.4), de la température de la source chaude (Figure 6.5, Figure 6.6) et de la pression de remplissage (Figure 6.7, Figure 6.8). Un accent particulier est mis sur la validation expérimentale du modèle par rapport aux différents gaz de travail. L'influence des gaz de travail air et hélium peut donc être expliquée. Les essais montrent que l'air a un meilleur potentiel de puissance à des vitesses faibles tandis que l'hélium montre un meilleur potentiel à des vitesses élevées. Selon le point de fonctionnement, il est donc possible de

choisir le gaz de travail le mieux adapté.

Ces résultats nous ont permis d'ajuster et de valider le modèle (par exemple en mesurant expérimentalement les pertes de charge afin de les modéliser au mieux).

Au final, nous avons obtenu un modèle numérique traduisant correctement l'influence de paramètres dimensionnels et fonctionnels sur la puissance d'un moteur Stirling.

6.2.1/ INFLUENCE DE LA VITESSE DE ROTATION

La Figure 6.3 et la Figure 6.4 présentent le cycle thermodynamique côté froid et côté chaud en utilisant l'air et l'hélium comme gaz de travail pour les vitesses extrêmes de 200 rpm et 1000 rpm. Les résultats expérimentaux sont en bon accord avec les résultats de modélisation.

Si l'hélium est utilisé comme gaz de travail, il est visible que les résultats de modélisation ne montrent pas de variation en fonction de la vitesse de rotation. Les résultats expérimentaux cependant, montrent une augmentation de pression en fonction de la vitesse de rotation sur les deux côtés ce qui entraîne à des vitesses élevées pour le moteur Stirling un travail plus important.

Les résultats numériques varient peu pour les vitesses testées. Ceci peut être expliqué par le fait que la chute de pression pour l'hélium est calculée à partir des valeurs mesurées pour l'air. Ceci souligne l'importance de définir les chutes de pression en fonction des caractéristiques du gaz de travail. Cependant, les tendances obtenues par la variation de la vitesse sont représentées correctement et les résultats d'optimisation vont fournir des bonnes tendances.

6.2.2/ INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE CÔTÉ CHAUD

La Figure 6.5 et la Figure 6.6 montrent l'influence de la température du côté chaud sur le diagramme PV en prenant comme valeurs 200 °C et 700 °C.

Pour les deux gaz de travail, une augmentation de la température du côté chaud augmente l'amplitude de pression et donc la performance. La cohérence entre les résultats expérimentaux et numériques est acceptable pour les deux gaz de travail air et hélium. On peut noter que la différence pour l'hélium a déjà été indiquée plus haut.

Comme la température du côté chaud a un impact sur la pression instantanée des gaz, sans distinction de gaz, il n'est pas surprenant que la Figure 6.6 montre une augmentation des puissances efficaces pour les deux gaz de travail pour toutes les vitesses. Les différentes pentes des courbes soulignent l'observation que la vitesse de rotation optimale augmente avec la température.

Cette évolution est décrite correctement pour le modèle air est acceptable pour le modèle hélium, malgré les différences dues au phénomène décrit avant.

6.2.3/ INFLUENCE DE LA PRESSION DE REMPLISSAGE

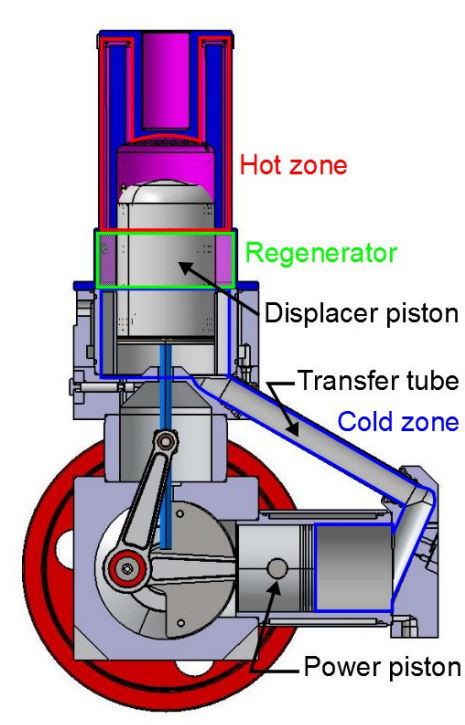
La Figure 6.7 montre le diagramme PV du côté chaud et froid pour l'air et l'hélium avec des pressions de remplissage de 2 bar absolu et 11 bar absolu. Comme on l'imagine, les pressions de remplissage du moteur Stirling ont une influence considérable sur la puissance moyenne durant le cycle. La chute de pression dépend majoritairement des

caractéristiques des gaz, densité et viscosité, qui sont influencées par la pression. Peu importe le gaz utilisé, la densité augmente avec la pression et mène à une augmentation des chutes de pression. La viscosité diminue quand la pression augmente et mène à une diminution des pertes de pression.

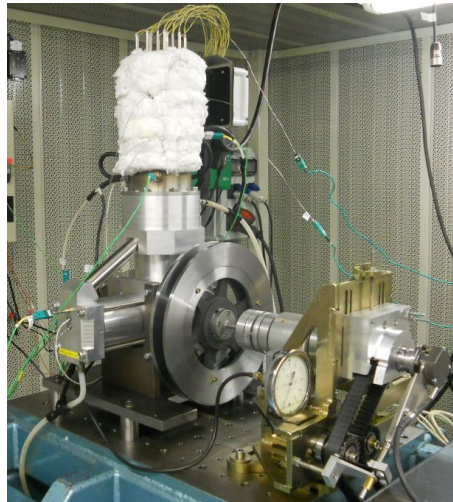
Néanmoins, l'augmentation de la densité est plus rapide pour l'air que pour l'hélium, la diminution de la viscosité est plus lente pour l'air que pour l'hélium et l'augmentation de la pression de remplissage mène à une diminution relative de la pression de l'hélium par rapport à l'air. Ceci explique pourquoi le moteur est plus efficace en utilisant de l'hélium à des pressions élevées.

Les résultats numériques sont satisfaisants pour notre gamme de pressions de remplissage. Néanmoins, il peut être observé que la valeur calculée de la variation de pression est plus petite que la valeur mesurée et que ce phénomène est légèrement plus important pour l'hélium dû à des raisons présentées auparavant.

Comme l'indiquait déjà les diagrammes PV au Figure 6.7, la Figure 6.8 montre que la puissance effective augmente avec la pression de remplissage, quelque soit le gaz de travail utilisé. Ce phénomène est décrit correctement par la simulation.



(a) coupe



(b) photo

FIGURE 6.2 – Moteur Stirling

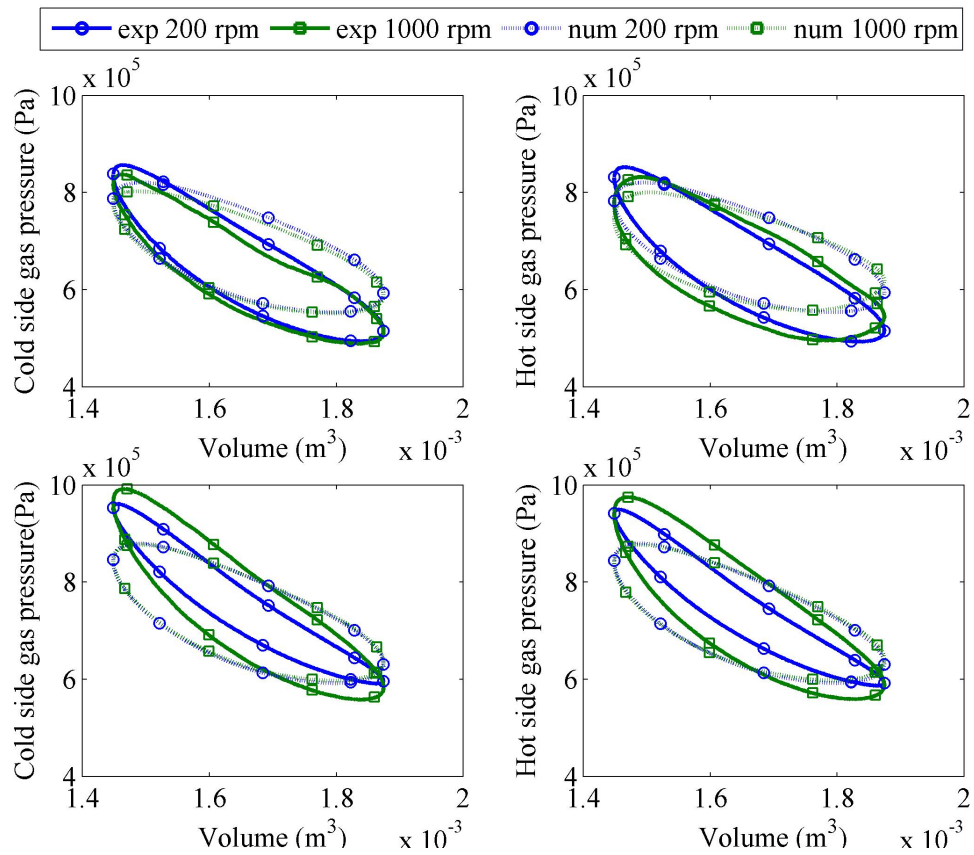


FIGURE 6.3 – Diagramme PV de l'influence de la vitesse sur la pression de gaz - air [dessus] et hélium [dessous] ($T_{wh}=700^{\circ}\text{C}$, $P_{mot}=7\text{ bar}$, tube 1)

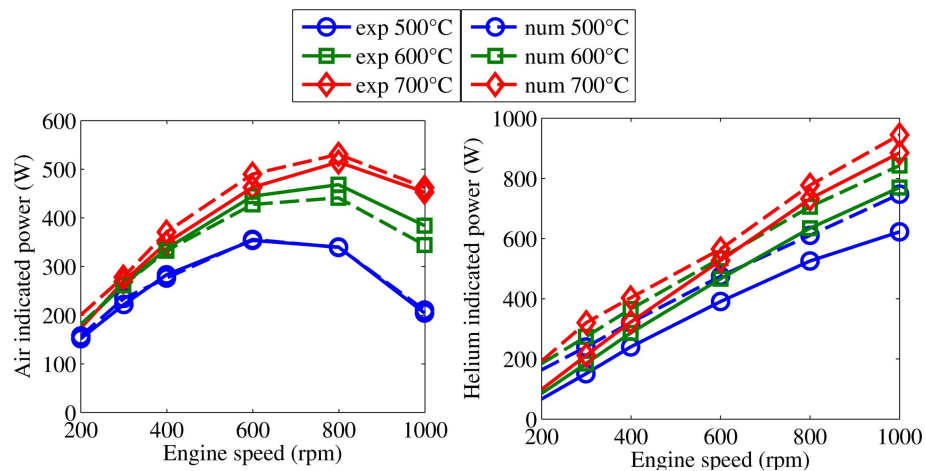


FIGURE 6.4 – Puissance effective pour différentes vitesses ($T_{wh}=700^{\circ}\text{C}$, tube 1)

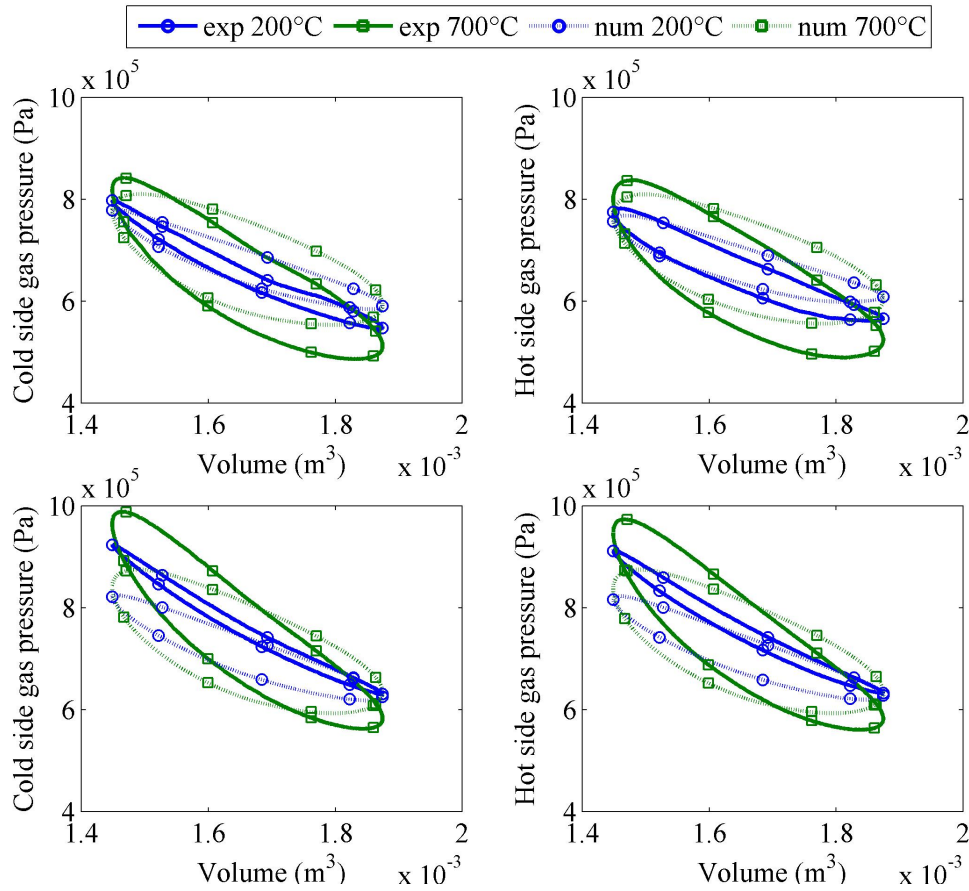


FIGURE 6.5 – Diagramme PV de l'influence de la température côté chaud - air [dessus] et hélium [dessous] ($N=600$ rpm, $P_{mot}=7$ bar, tube 1)

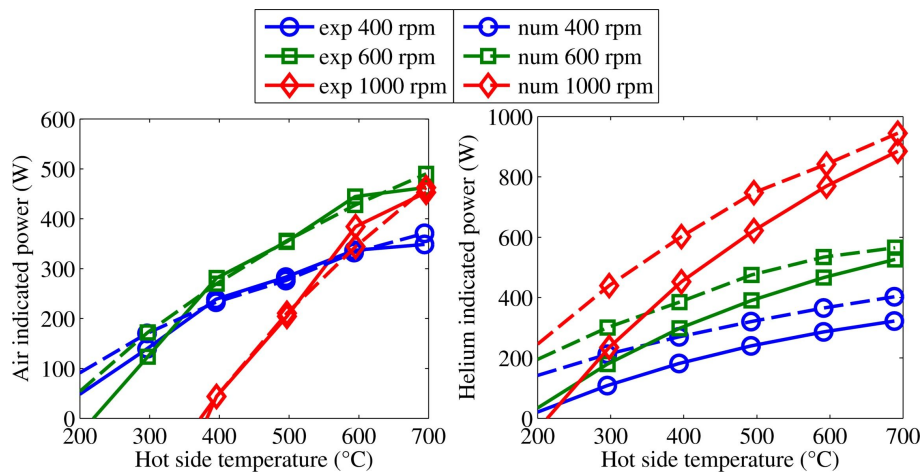


FIGURE 6.6 – Puissance effective en fonction de la température côté chaud pour différentes vitesses ($P_{mot}=7$ bar, tube 1)

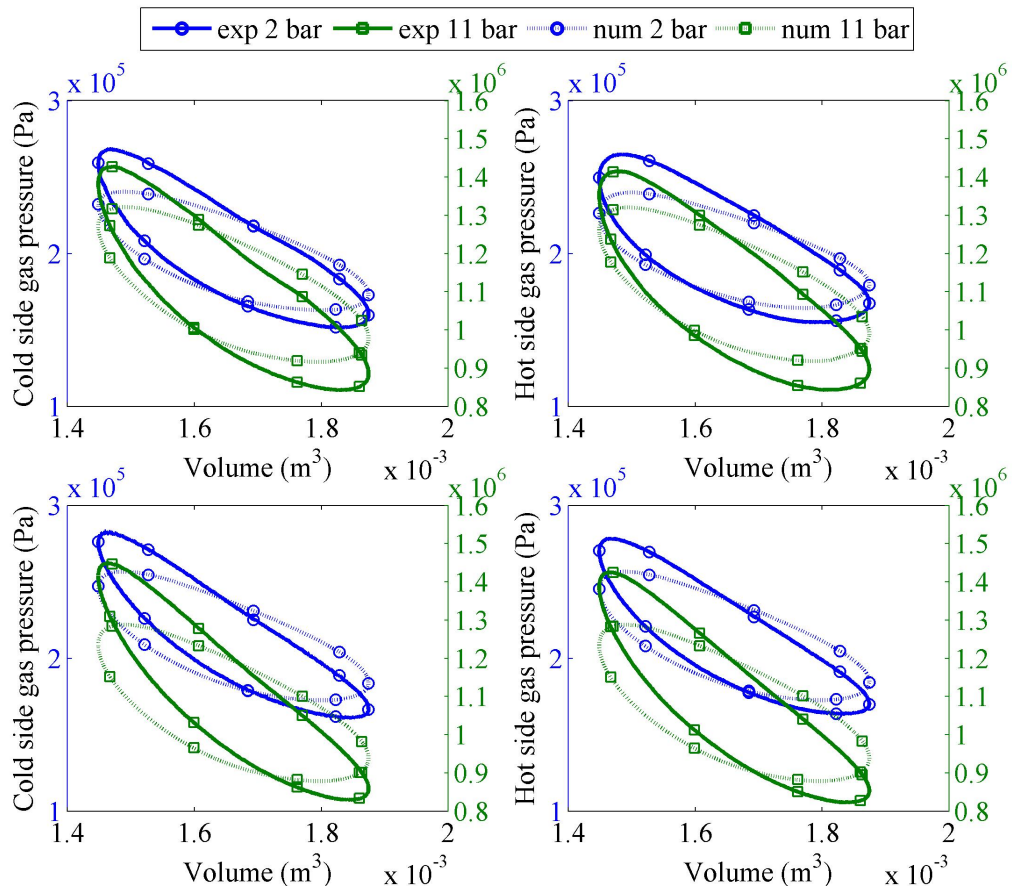


FIGURE 6.7 – Influence de la pression de remplissage sur la pression de gaz instantanée - air [dessus] et hélium [dessous] ($N=600$ rpm, $T_{wh}=700$ °C, tube 1)

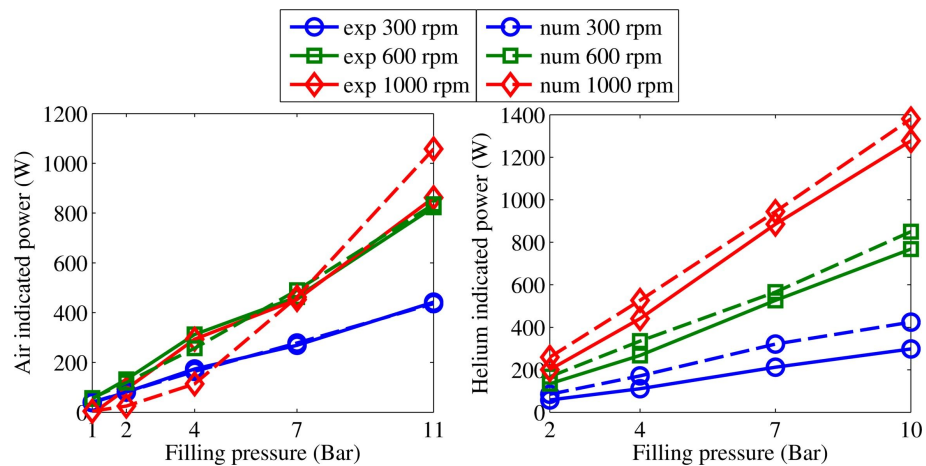


FIGURE 6.8 – Puissance effective en fonction de la pression pour différentes vitesses ($T_{wh}=700$ °C, tube 1)

6.3/ OPTIMISATION DU MOTEUR STIRLING

Après validation, le modèle peut être utilisé pour prédire l'influence de certains paramètres, comme les dimensions et les cinématiques, sur la performance du moteur Stirling. L'application prévue impose des limitations, comme la source de chaleur ou la limitation du poids pour une utilisation mobile. C'est pour cette raison que le modèle est associé à un algorithme d'optimisation qui permet de trouver une idée de la configuration du moteur Stirling pour une application donnée.

Afin d'obtenir un modèle cohérent, un algorithme d'optimisation multi-variable est requis. Les algorithmes les mieux adaptés dans ce domaine sont basés sur des méthodes stochastiques qui utilisent des paramètres aléatoires afin d'éviter des optima locaux. Différents algorithmes comme les algorithmes génétiques ou biologiques, basés sur le comportement de groupe peuvent fournir des résultats.

Finalement, l'optimisation essaim de particule (Particle Swarm Optimization - PSO) est choisie pour sa facilité d'utilisation et sa convergence rapide. Cet algorithme a été développé en 1995 par Russel Eberhard et James Kennedy [224]. Le principe de fonctionnement est basé sur le postulat que la communication entre les individus d'un groupe permet au groupe un comportement plus intelligent que la somme des intelligences individuelles, par exemple dans un essaim d'abeilles.

6.3.1/ OPTIMISATION DE LA CINÉMATIQUE

L'optimisation est utilisée afin d'adapter les cinématiques d'un moteur Stirling en améliorant sa puissance. Une étude comparable a été effectuée par Solmaz et Karabulut [225]. Il est intéressant de savoir si un système bielle-manivelle est la cinématique la plus adaptée et si la nature du gaz de travail a une influence sur le fonctionnement. Pour cela le moteur existant est utilisé comme point de départ. Dans cette configuration les volumes côté chaud et côté froid à chaque instant sont définis par les dimensions et les cinématiques. Il est donc très utile de disposer d'une approche modulaire pour décrire les volumes du moteur. Ici la fonction initiale de la cinématique est remplacée par un vecteur avec 123 dimensions et des limites bien définies qui peuvent être changées par l'optimisation.

Les cinématiques du moteur sont optimisées pour des vitesses de rotation de 300 rpm et des gaz de travail air et hélium. Les autres paramètres sont considérés comme constant avec une pression de remplissage de 11 bar et une température de source chaude de 700 °C.

Les résultats d'optimisation pour l'air comme gaz de travail sont présentés en Figure 6.9. Ils montrent la même cinématique générale que la solution initiale (système bielle-manivelle), mais avec trois différences :

- Le mouvement du piston n'est pas continu, il y a un arrêt au point maximum et minimum.
- Le mouvement du piston du moteur optimisé est moins symétrique que le comportement initial. Il montre une pente croissante plus élevée que la pente décroissante.
- Ce qui mène à un déphasage pendant le cycle qui varie de 90° au début du cycle, à 100° pour la position maximum de chaque piston.

La modification de la cinématique a une incidence directe sur les courbes de volume et

son influence sur la puissance indiquée en fonction de la vitesse est présentée en Figure 6.9b. On peut voir que l'optimisation cinématique mène à une augmentation de la puissance à des faibles vitesses de rotation, mais diminue la puissance maximale par rapport à la configuration initiale. De plus, la puissance maximale a lieu à des vitesses de rotation plus basses (l'optimisation était effectuée pour une vitesse de rotation de 300 rpm). Cette observation souligne le fait que la configuration d'un moteur Stirling dépend largement des conditions de travail et que la configuration, qui est bien adaptée pour un point de fonctionnement ne l'est pas pour un autre.

Pour l'optimisation en utilisant l'hélium comme gaz de travail les mêmes conclusions que pour l'air peuvent être tirées, notamment :

- Les pistons montrent un arrêt sur la position minimum et maximum.
- Le mouvement du piston moteur est moins symétrique que le mouvement du piston déplaceur.
- Le déphasage durant le cycle varie de 90° au début du cycle à 100° à la position maximum de chaque piston.

La modification de la cinématique influence directement les courbes de volume et il semble que l'augmentation de la surface dans le diagramme PV (Figure 6.10a) mène à une amélioration de l'échange de chaleur. Cette impression est confirmée par le gain de puissance en utilisant l'hélium comme gaz de travail.

L'influence de la cinématique optimisée sur toutes les vitesses est présentée en Figure 6.10b. On peut voir que les cinématiques optimisées mènent à une augmentation quasi constante de puissance pour les vitesses jusqu'à 1000 rpm. Le point de puissance maximum se déplace vers des vitesses plus faibles.

Il peut être constaté que l'optimisation des paramètres de système a permis d'augmenter la puissance de 22% pour les deux gaz de travail. Les analyses révèlent également que les cinématiques optimisées ressemblent à celles d'un système bielle-manivelle indépendant des gaz de travail choisis. De plus, l'augmentation de la puissance à un point de fonctionnement donné peut limiter la puissance maximale à d'autres points de fonctionnement.

6.3.2/ APPLICABILITÉ DE L'APPROCHE D'OPTIMISATION DU MOTEUR STIRLING

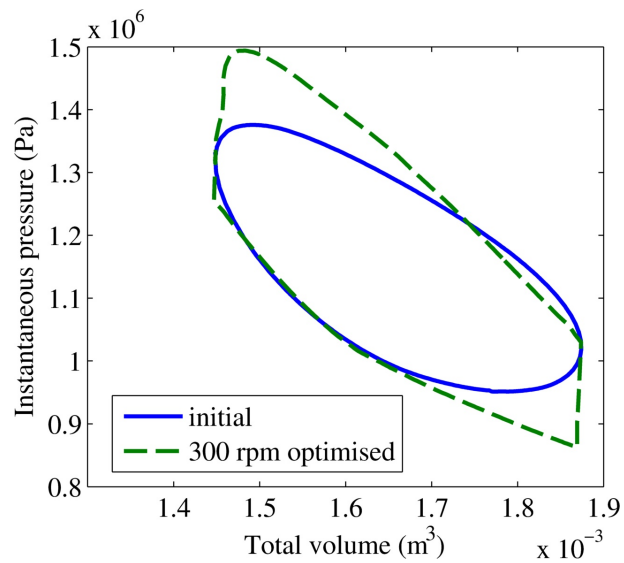
Le but de ce travail était de créer un outil qui permette de définir les caractéristiques d'un moteur Stirling en fonction de l'application souhaitée et des contraintes s'appliquant au moteur. Pour cela, un modèle a été créé pour un moteur Stirling avec une puissance maximale de 1 kW, des gaz de travail air et hélium, des pressions de gaz entre 1 bar pour l'air et 2 bar absolu pour l'hélium et 11 bar absolu pour les deux gaz de travail, une température de la source chaude entre 200°C et 700°C et une vitesse de rotation entre 200 rpm et 1000 rpm.

La validation expérimentale des valeurs numériques a été satisfaisante par rapport à la puissance effective, même si des améliorations à la description des pertes de charge à l'intérieur des cylindres devaient être effectuées pour hélium.

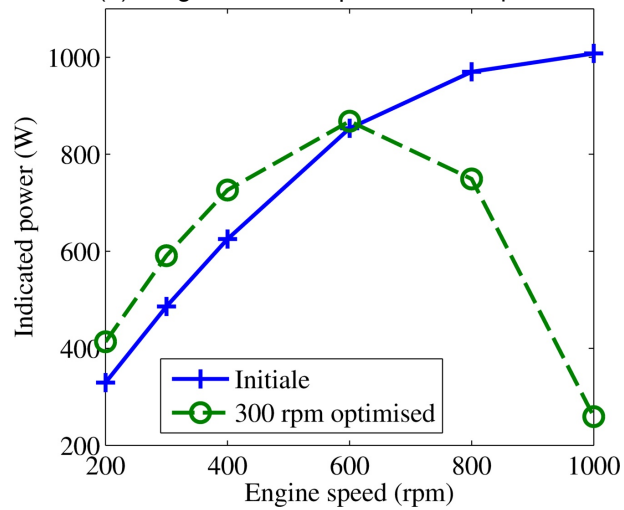
Ce modèle a été enrichi par une optimisation basée sur les essaims de particules. Une optimisation de la cinématique pour un point de fonctionnement a montré la puissance de cette approche [223].

Néanmoins, il serait intéressant d'appliquer cette optimisation sur d'autres points de fonctionnement, de varier les contraintes ainsi que les données à optimiser. De plus, un autre

axe pourrait être de vérifier les performances pronostiquées avec d'autres approches de modélisation ou d'expérimentation plus abouties. On peut souhaiter que l'optimisation des configurations du moteur Stirling trouve de vastes applications.

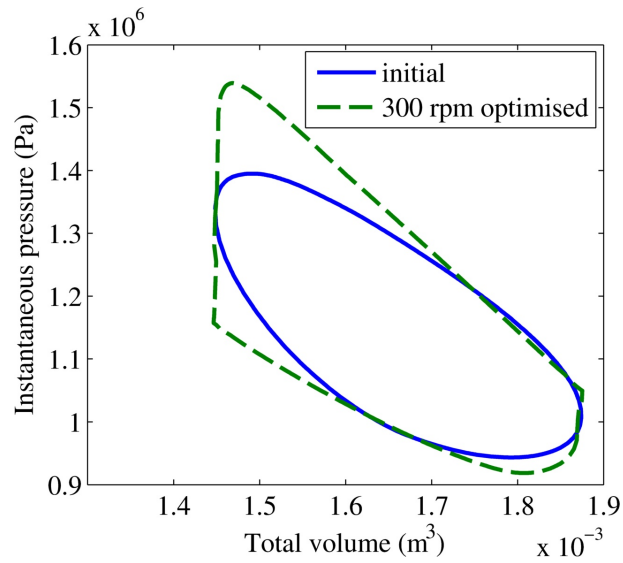


(a) Diagramme PV optimisé : 300 rpm

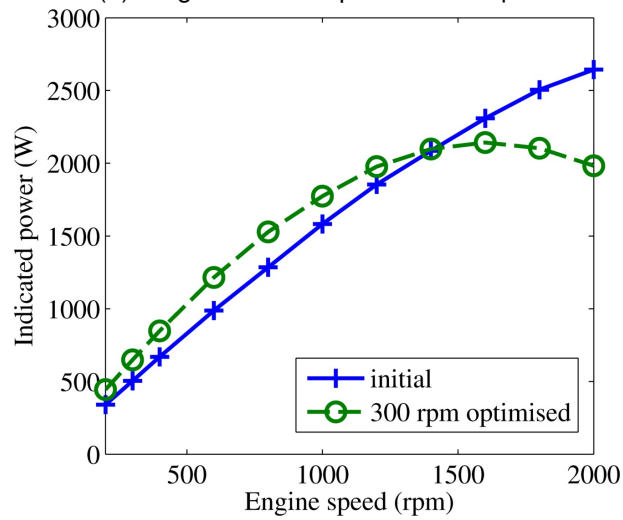


(b) [Influence de la cinématique optimisée

FIGURE 6.9 – Optimisation avec air, 10 bar, 700 °C



(a) Diagramme PV optimisé : 300 rpm



(b) Influence de la cinématique optimisée

FIGURE 6.10 – Optimisation avec hélium, 10 bar, 700 °C

EXPÉRIENCE DANS L'ANIMATION DE RECHERCHE

7.1/ THÈSES DE DOCTORAT, MASTERS ET PROJETS DE FIN D'ÉTUDES

Le projet scientifique présenté englobe différents sujets, issus de différents secteurs de recherche comme l'ingénierie thermique ou l'ingénierie électrique. Le point commun entre eux et leur but final est d'améliorer l'efficacité énergétique des véhicules. Tous les projets sont menés au sein du laboratoire DRIVE EA1859 avec parfois des coopérations avec d'autres chercheurs de l'équipe IRTES-SET (maintenant Femto-ST/Energie) ou des partenaires industriels. Cette multitude de sujets a uniquement pu être traitée grâce à la coopération d'autres chercheurs confirmés et à travers six thèses de doctorats, trois mémoires de master et deux projets de fin d'études.

7.1.1/ THÈSES DE DOCTORAT

7.1.1.1/ CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE LA VALORISATION DES REJETS THERMIQUES - ÉTUDE ET OPTIMISATION DE MOTEURS STIRLING

- **Nom** : Juliette BERT
- **Type** : Thèse CIFRE en coopération avec Danielson Engineering
- **Directeur de Thèse** : Luis Le Moyne
- **Encadrants** : Tonino Sophy (coencadrant), Daniela Chrenko (coencadrant), Frédéric Sirot (encadrant industriel)
- **Date** : 09.2009 - 09.2012
- **Références** : 2 articles de journal [216], [223], 2 articles de conférence [222], [226]

7.1.1.2/ EFFECTIVE SIMULATION MODEL AND NEW CONTROL STRATEGY TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY IN HYBRID AND ELECTRIC LAND VEHICLE

- **Nom** : Zainab ASUS
- **Type** : Thèse en coopération avec l'Université Technologique de Malaisie (UTM)
- **Directeur de Thèse** : Luis Le Moyne

- **Encadrants** : El-Hassane Aglzim (coencadrant), Daniela Chrenko (coencadrant)
- **Date** : 09.2011 - 12.2014
- **Références** : deux articles de journal [18] et [227], 5 articles de conférence avec comité de sélection [2], [3], [20], [32], [228]

7.1.1.3/ CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DU COMPORTEMENT THERMIQUE DE LA BATTERIE LITHIUM-ION POUR VÉHICULES ELECTRIQUES ET HYBRIDES

- **Nom** : Zul Hilmi CHE DAUD
- **Type** : Thèse en coopération avec l'Université Technologique de Malaisie (UTM)
- **Directeur de Thèse** : Luis Le Moyne
- **Encadrants** : El-Hassane Aglzim (coencadrant), Daniela Chrenko (coencadrant)
- **Date** : 09.2011 - 12.2014
- **Références** : 1 article de journal [152], 6 articles de conférence avec comité de sélection, dont 2 en premier auteur [229], [230] et 4 comme deuxième auteur [18], [32], [134], [228]

7.1.1.4/ STRATÉGIE INTELLIGENTE DE GESTION DU SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE GLOBAL D'UN VÉHICULE HYBRIDE

- **Nom** : Loïc JOUD
- **Type** : Thèse CIFRE en coopération avec Danielson Engineering
- **Directeur de Thèse** : Luis Le Moyne
- **Encadrants** : Alan Keromnes (coencadrant), Daniela Chrenko (coencadrant), Rui Da Silva (encadrant industriel)
- **Date** : 01.2015 - 12.2017

7.1.1.5/ DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE GESTION DE VÉHICULE HYBRIDE MULTI ARCHITECTURE/MULTI APPLICATION

- **Nom** : Shiyu GAN
- **Type** : Thèse CIFRE en coopération avec SODEMO
- **Directeur de Thèse** : Luis Le Moyne
- **Encadrants** : Daniela Chrenko (coencadrant), Philippe Boulliot (encadrant industriel)
- **Date** : 09.2014 - 09.2017
- **Références** : 1 article de conférence avec comité de sélection publié [47], 1 article de conférence avec comité de sélection [125], 1 article de conférence accepté

Cette activité d'encadrement de doctorats considérable a été reconnue par l'attribution d'une Prime d'encadrement doctoral et de recherche (PEDR) obtenue en 2014.

7.1.2/ MÉMOIRES DE MASTER

7.1.2.1/ DÉVELOPPEMENT D'UN GÉNÉRATEUR DE CYCLES DE CONDUITE

- **Nom** : Irene GARCIA DIEZ
- **Type** : Stage de fin d'études suivi par une thèse de master (MEETING)
- **Encadrants** : Daniela Chrenko
- **Date** : 09.2010 - 08.2012
- **Références** : 2 articles de conférence avec comité de sélection [31], [231]

7.1.2.2/ DIMENSIONNEMENT DES COMPOSANTS DES VÉHICULES HYBRIDES SUR LEUR DURÉE DE VIE

- **Nom** : Shiyu GAN
- **Type** : thèse de master (AESM)
- **Encadrants** : Daniela Chrenko
- **Date** : 01.2013 - 08.2013
- **Références** : 1 article de conférence avec comité de sélection [32]

7.1.2.3/ MODÉLISATION MULTI-PHYSIQUE D'UNE PILE À COMBUSTIBLE PEM

- **Nom** : Raaj Ganesh SAMIKANNU RAMESH
- **Type** : thèse de master (AESM)
- **Encadrants** : Daniela Chrenko
- **Date** : 01.2014 - 08.2014
- **Références** : 1 article de conférence [193]

7.1.3/ PROJETS DE RECHERCHE

7.1.3.1/ ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES PARAMÈTRES ENVIRONNEMENTAUX SUR LES BESOINS D'ÉNERGIE DES VÉHICULES CONVENTIONNELS ET HYBRIDES

- **Nom** : Baptiste VALET
- **Type** : projet de fin d'études EPEE
- **Encadrants** : Alan Keromnes, Daniela Chrenko
- **Date** : 01.2015 - 07.2015
- **Références** :

7.1.3.2/ DESCRIPTION DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES À DIFFÉRENTS EN-DROITS ET DESCRIPTION DU COMPORTEMENT D'UNE MACHINE SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS

- **Nom** : Carlos DAMAS
- **Type** : projet de fin d'études UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

- **Encadrants** : Alan Keromnes, Daniela Chrenko
- **Date** : 02.2016 - 07.2015
- **Sujet** : suite du projet de Baptiste VALET
- **Références** :

7.2/ COOPÉRATIONS INDUSTRIELLES

Le projet scientifique m'a permis de faire des coopérations industrielles, j'ai notamment pu intégrer le projet Noao du Pôle de Performance Nevers Magny-Cours (PPNMC), qui m'a permis de participer à la conception et à la fabrication d'un véhicule hybride série de compétition. Ce véhicule a été utilisé comme base pour les travaux de thèse de Zainab ASUS (paragraphe 7.1.1.2) et Zul Hilmi CHE DAUD (paragraphe 7.1.1.3). Actuellement, la Noao est également utilisée comme base de travail pour la thèse de Shiyu Gan (paragraphe 7.1.1.5).

A travers différentes thèses de type Cifre, comme celles de Juliette BERT (paragraphe 7.1.1.1), et Loïc JOUD (paragraphe 7.1.1.4) ou encore de Shiyu GAN (paragraphe 7.1.1.5), j'ai pu profiter d'une coopération étroite avec des compagnies spécialisées dans le monde automobile, notamment Danielson Engineering ou SODEMO.

7.3/ COOPÉRATIONS UNIVERSITAIRES

Mon projet scientifique m'a permis de faire des coopérations avec différentes universités. En 2013, j'ai effectué un séjour de recherche au Canada dans les universités Windsor, à Windsor Ontario et Concordia à Montréal, Québec, qui a engendré la venue du Professeur Narayan KAR de l'université Windsor, Ontario en tant que professeur invité à l'ISAT en juin 2014. Les sujets traités étaient concentrés surtout sur les moteurs électriques et leur utilisation dans les véhicules hybrides ainsi que la recharge inductive des batteries Lithium-ion.

Le séjour de six semaines à l'Université Concordia à Montréal en coopération avec le Professeur Sheldon WILLIAMSON, portait sur différents aspects, comme l'utilisation de convertisseurs dédiés aux véhicules hybrides notamment la connexion entre un réseau et un véhicule hybride plug-in (thèse Florence Berthold [40]), l'utilisation des super condensateurs pour hybrider un métro (master de Nina Naghizadeh) et l'influence de l'éco-conduite à la consommation des véhicules hybrides [1].

Grâce à une aide du DAAD (Deutscher Akademischer Auslandsdienst - Equivalent Allemand de Campus France) j'ai pu passer un mois à la Hochschule Karlsruhe (un des partenaires Erasmus de l'ISAT) dans l'Institut of Energy Efficient Mobility (IEEM) sous la direction de Professeur Reiner KRIESTEN. J'y ai travaillé sur les différents modes de gestion des véhicules hybrides [47], mais également sur la consommation dans les véhicules grâce à des logiciels avancés en coopération avec un doctorant de l'IEEM, Christian Gutenkunst [36].

De plus, il existe une coopération avec l'Université de Technologie de Belfort Montbéliard, notamment avec le laboratoire Femto-ST/Energie (IRTES-SET auparavant) à travers un projet région Franche-Comté sur l'étude du vieillissement des piles à combustible et le co-encadrement de deux thèses de doctorat.

7.3.1/ THÈSES DE DOCTORAT EN COOPÉRATION AVEC D'AUTRES UNIVERSITÉS

7.3.1.1/ ANALYSIS OF AGING MECHANISMS IN LI-ION CELLS USED FOR TRACTION BATTERIES OF ELECTRIC VEHICLES AND DEVELOPMENT OF APPROPRIATE DIAGNOSTIC CONCEPTS FOR THE QUICK EVALUATION OF THE BATTERY

- **Nom** : Christian Schlasza
- **Type** : Thèse en coopération avec la Hochschule Karlsruhe et Bosch Engineering
- **Directeur de Thèse** : Abdellatif Miraoui - IRTES-SET
- **Encadrants** : David Bouquain - UTBM (coencadrant) Daniela Chrenko (coencadrant), Reiner Kriesten - HSKa (co-directeur de thèse), M. Dörr (encadrant industriel)
- **Date** : 09.2012 - 09.2016
- **Références** : 1 article de conférence avec comité de sélection publié [154]

7.3.1.2/ THE ROLE OF KNOWLEDGE MANAGEMENT IN SYSTEMS ENGINEERING FOR AUTOMATED DRIVING FUNCTIONS

- **Nom** : Ferdinand Schäfer
- **Type** : Thèse en coopération avec la Hochschule Karlsruhe et ITK Engineering
- **Directeur de Thèse** : Franck Gechter - IRTES
- **Encadrants** : Alexandre Ravey - UTBM (coencadrant), Daniela Chrenko (coencadrant), Reiner Kriesten - HSKa (coencadrant), Pascal Vollmer (encadrant industriel)
- **Date** : 09.2015 - 09.2018
- **Références** : 1 article de conférence avec comité de sélection publié [?]

7.3.2/ PROJET RÉGION FRANCHE-COMTÉ 2013 (UTBM)

Le projet région Franche-Comté 2013 (UTBM) portait le titre Caractérisation et modélisation des mécanismes de vieillissement de pile à combustible de type PEMFC. Le but du projet était d'essayer différentes méthodes de vieillissement accéléré afin d'identifier leur influence sur le comportement des piles à combustible. Ce travail donne lieu à une thèse de doctorat de Yiming WU. Le travail vise à tester trois stacks de pile à combustible de type PEMFC en parallèle sur une longue durée.

7.4/ RECONNAISSANCES SCIENTIFIQUES

Le projet scientifique présenté est reconnu à travers des séjours en tant que chercheur invité à différentes reprises, notamment dans le cadre :

- d'une formation d'une semaine au niveau master à l'Université Technologico de Monterrey au Mexique en Avril 2012, renouvelé en Septembre 2016.
- d'une intervention à l'Université Windsor, Ontario, Canada en Juin 2013.
- d'une présentation au groupe régional d'IEEE Trois Rivières, Quebec, Canada en Juin 2013.
- d'un workshop international organisé par le groupe régional d'IEEE à Abu Dhabi de l'Université Al-Ain, Abu Dhabi en Février 2014.

- d'une présentation à la conférence ACI Energy Storage 2017 en Février 2017 pour parler du vieillissement des batteries automobiles.
- d'une participation au workshop CENELEC - Energy Storage - The standards we need en Mars 2017 à Bruxelles, Belgique.

En outre, j'ai pu co-organiser deux sessions spéciales pour la conférence FDFC 2013 (Fundamentals and Developpements in Fuel Cells, Karlsruhe, Germany, April 2013) sur le transport terrestre et IEEE ECON 2015, Seoul, Corée sur l'application des convertisseurs pour des systèmes pile à combustible. Malheureusement, les deux sessions spéciales n'ont pas été retenues, mais j'ai pu néanmoins agir comme chairman pour une partie de la conférence FDFC 2013.

J'ai également participé aux comités d'organisation de cette dernière et de la conférence IEEE International Transportation Electrification Conference (ITEC) en 2014, 2015 et 2016 et je participe activement à l'organisation de la conférence IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference (VPPC) 2017.

Mes activités de recherche m'ont permis d'obtenir le statut de senior member IEEE fin 2014.

De plus, je suis contactée régulièrement pour agir en tant que reviewer dans différents journaux scientifiques. J'ai effectué, entre autres, huit reviews pour le Journal of Hydrogen Energy, cinq reviews pour IEEE Transactions on Industrial Electronics et de nombreux autres journaux comme par exemple : Energie, International Journal of Energy, Fuel Cells, IET Electrical Systems in Transportation, Advances in Mechanical Engineering. J'ai également effectué un nombre considérable de reviews pour des articles de conférence, entre autres pour IEEE International Transportation Electrification Conference (ITEC) et Fundamentals and Development in Fuel Cells (FDFC).

7.5/ PUBLICATIONS

Mes activités de recherche m'ont amené à publier douze articles de journal dont six comme premier auteur, dix-huit articles de conférence internationale avec actes et comité de sélection sur résumé dont huit comme premier auteur, trois congrès internationaux avec actes et comité de sélection sur texte complet, tous en premier auteur et deux séminaires invités.

Les détails des publications peuvent être trouvés ci-dessous et dans la partie bibliographique du rapport.

ARTICLES DE JOURNAL

Asus, Z. ; Aglzim, E.-H. ; **Chrenko, D.** & Le Moyne, L. "Fuel Consumption Evaluation of a Hybrid Electric Car over Aggressive Cycles for Thermal Engine Optimization", International Journal of Advanced and Applied Sciences, 2017, [227]

Che Daud, Z. H. ; **Chrenko, D.** ; Dos Santos, F. ; Aglzim, E.-H. ; Keromnes, A. & Le Moyne, L. "3D electro-thermal modelling and experimental validation of Lithium Polymer Based Batteries for Automotive Applications", International Journal of Energy Research, 2016 [152]

Chrenko, D. "Influence of Hybridation on Eco-driving Habits using Realistic Driving Cy-

cles”, IET Intelligent Transport Systems - Special Issue : Energy issues in transport systems and the role of ITS, 2015 [1]

Bert, J. ; **Chrenko, D.** ; Sophy, T. ; Le Moyne, L. & Sirot, F. “Simulation, experimental validation and kinematic optimization of a Stirling engine using air and helium”, *Energy*, 2014, 78, 701 - 712 [223]

Asus, Z. ; Aglzim, E.-H. ; **Chrenko, D.** ; Che Daud, Z. H. & Le Moyne, L. “Dynamic Modeling and Driving Cycle Prediction for a Racing Series Hybrid Car”, *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics (JESTPE)*, 2013, PP Issue 99, 1 [18]

Aglzim, E.-H. ; Jamaluddin, A. M. B. & **Chrenko, D.** “Impedance Spectrometer Modelling in Matlab/Simulink for Measuring the Complex Impedance of a Fuel Cell - EIS method”, *Journal of Clean Energy Technologies*, 2013, 1, 255-259 [232]

J. Bert, **D. Chrenko**, T. Sophy, L. Le Moyne, and F. Sirot, “Zero dimensional finite-time thermodynamic, three zones numerical model of a generic stirling and its experimental validation,” *Renewable Energy*, vol. 47, pp. 167–174, 2012 [216]

F. Gao, **D. Chrenko**, B. Blunier, D. Bouquain, and A. Miraoui, “Multi-rates fuel cell emulation with spatial reduced real-time fuel cell modelling,” *Transactions on Industry Applications*, vol. 48, pp. 1127 – 1135, 2012 [233]

D. Chrenko, F. Gao, B. Blunier, D. Bouquain, and A. Miraoui, “Methanol fuel processor and pem fuel cell modeling for mobile application,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 13, pp. 6863–6871, July 2010 [114]

D. Chrenko, S. Lecoq, E. Herail, D. Hissel, and M.-C. Péra, “Static and dynamic modeling of a diesel fed fuel cell power supply,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, pp. 1377–1389, 2009 [94]

D. Chrenko, S. Lecoq, E. Herail, M.-C. Péra, and D. Hissel, “Model based control of a diesel supplied low temperature fuel cell system,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Special Session on fuel cell power, 2009 [234]

D. Chrenko, J. Coulié, M.-C. Péra, and D. Hissel, “Static and dynamic modeling of a diesel fuel processing unit for polymer electrolyte fuel cell supply,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, pp. 1324–1335, 2009 [94]

D. Chrenko, M.-C. Péra, and D. Hissel, “Inversion-based control of a pem fuel cell system using energetic macroscopic representation,” *ASME Journal of Fuel Cell Science and Technology*, vol. 6, no. 2, p. 024501 (5 pages), May 2009 [235]

CONGRÈS INTERNATIONAUX AVEC ACTES ET SÉLECTIONS SUR TEXTE RÉSUMÉ

Chrenko, D. ; Gan, S. ; Boulliot, P. & Le Moyne, L. “Multi-Architecture / Multi-Application Modelling Approach for Hybrid Electric Vehicle Using Energetic Macroscopic Representation”, *SESDE, Larnaca, Cyprus*, October 2016 [125]

Chrenko, D. ; Gan, S. ; Gutenkunst, C. ; Kriesten, R. & Le Moyne, L. “Novel Classification of Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles”, *IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Montréal, Canada, October 2015 [47]

Gutenkunst, C. ; **Chrenko, D.** ; Kriesten, R. ; Neugebauer, P. ; Jäger, B. & Giereth, T. “Route Generation Algorithm Based on OpenSoOpen Data to Predict Energy Consumption

of Different Vehicles”, IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference VPPC, Montréal, Canada, October 2015 [36]

Asus, Z. ; **Chrenko, D.** ; Aglzim, E.-H. ; Kebairi, A. ; Keromnes, A. & Le Moyne, L., “Model and Control Strategy Simulation of a Racing Series Hybrid Car”, IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference (VPPC), Combeira, Portugal, October 2014 [2]

Che Daud, Z. H. ; **Chrenko, D.** ; Aglzim, E.-H. ; Keromnes, A. & Le Moyne, L. “Experimental Study of Lithium-ion Battery Thermal Behaviour for Electric and Hybrid Electric Vehicles”, IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference (VPPC)”, Combeira, Portugal, October 2014 [229]

Chrenko, D. ; Ravey, A. ; Roche, R. ; Bouquain, D. & Miraoui, A. “Autonomy Estimation for EV based on Road Planning Software”, IEEE Transportation Electrification Conference (iTEC), Dearborn, US, June 2014 [37]

Schlasza, C. ; Ostertag, P. ; **Chrenko, D.** ; Kriesten, R. & Bouquain, D. “Review on the aging mechanisms in Li-ion batteries for electric vehicles based on the FMEA method”, IEEE Transportation Electrification Conference (iTEC), Dearborn, US, June 2014 [154]

Chrenko, D. ; Ravey, A. ; Djerdir, A. & Miraoui, A. “Adaptive Control of Hybrid Vehicle Depending on Driving Cycle Analysis” IECON, 2013, 4550 - 4555 [236]

D. Chrenko, Z. H. Che Daud, Z. Asus, S. Gan, E.-H. Aglzim, and L. Le Moyne, “Sizing of ice and lithium-ion battery for series hybrid vehicle over life cycle with battery aging,” in IEEE Transportation Electrification Conference (iTEC), Dearborn, US, June 2013 [32]

Daboussy, M. ; **Chrenko, D.** ; Aglzim, E.-H. ; Che Daud, Z. H. & Le Moyne, L. “Characterisation of a Commercial Automotive Lithium Ion Battery Using Extended Kalman Filter” IEEE Transportation Electrification Conference (iTEC), Dearborn, US, June 2013 [134]

Z. Asus, E.-H. Aglzim, **D. Chrenko**, and L. Le Moyne, “Parametric design and sizing of a fuel cell hybrid electric racing car,” in FDFC, Karlsruhe, Germany, April 2013 [20]

J. Bert, **D. Chrenko**, T. Sophy, L. Le Moyne, and F. Sirot, “Optimisation thermodynamique en temps fini d’une cinématique de moteur stirling,” in Cofret 12, Sozopol, Bulgarie, 2012 [226]

Z. Asus, **D. Chrenko**, E.-H. Aglzim, A. Keromnes, and L. Le Moyne, “Simple method of estimating consumption of internal combustion engine for hybrid application,” in IEEE Transportation Electrification Conference (iTEC), Dearborn, US, June 2012 [3]

F. Gao, **D. Chrenko**, M. Dou, D. Bouquain, and A. Miraoui, “Multi-rates fuel cell emulation with spatial reduced real-time fuel cell modelling,” in Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2011 IEEE, 2011, pp. 1–8 [233]

E.-H. Aglzim, A. M. Bin Jamaluddin, **D. Chrenko**, and A. Rouane, “Impedance spectrometer modelling in matlab/simulink for measuring the complex impedance of a fuel cell - eis method,” in International Conference on Informatics, Environment, Energy and Applications., Bali, Indonesia, March 2013 [128]

D. Chrenko, I. Garcia Diez, and L. Le Moyne, “Artificial driving cycles for the evaluation of energetic needs for electric vehicles,” in IEEE Transportation Electrification Conference (iTEC), Dearborn, US, June 2012 [31]

D. Chrenko, E.-H. Aglzim, D. Bouquain, L. Le Moyne, and A. Miraoui, “Design and modeling of a hybrid scooter, containing a high temperature pem fuel cell system and lithium

ion battery,” in H2 Expo Hamburg, Germany : H2 Expo, June 2011 [112]

D. Chrenko “Modeling and control of fuel cell systems by energetic macroscopic representation,” in ASME Conference for Fuel Cell Science and Technology, Brooklyn, New-York, USA, June 2007, p. 155, (article accepted for publication in ASME Journal of fuel cell science and technology) [237]

D. Chrenko, M.-C. Péra, D. Hissel, and M. Geweke, “Macroscopic modeling of a pefc system based on equivalent circuits of fuel and oxidant supply,” ASME Journal of Fuel Cell Science and Technology, vol. 5, pp. 011 015–1 – 011 015–5, 2008 [238]

CONGRÈS INTERNATIONAUX AVEC ACTES ET SÉLECTIONS SUR TEXTE COMPLÈTES

Schäfer, F. ; **Chrenko, D.** ; Ravey, A. & Gechter, F., “No need to learn from each other ? - Potentials of Knowledge Modeling in Autonomous Vehicle Systems Engineering”, International Conference on Engineering, Technology and Innovation ICE/ITEM, Madeire, Portugal, 2017[?]

D. Chrenko, I. Garcia Diez, D. Bouquain, L. Le Moyne, and A. Miraoui, “An energy and power based approach toward design of power split for urban hybrid vehicle,” in IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference. Chicago, Illinois, USA : IEEE, September 2011 [231]

D. Chrenko, D. Bouquain, and A. Miraoui, “Fuel cell electric scooter : Comparison between a hydrogen direct and a methanol hybrid architecture,” in IECON. Porto, Portugal : IEEE, November 2009, best Paper Prize of the Power Electronics Technical Committee (PETC) of the IEEE Industrial Electronics Society (IES) among the papers presented at the 2009 IECON [239]

D. Chrenko, M. Kabalo, F. Gao, B. Blunier, D. Bouquain, and A. Miraoui, “Fuel cell electric scooter : Considerations toward an optimized architecture,” in Vehicular Power and Propulsion Conference (VPPC), Lille, France, September 2010 [240]

SÉMINAIRES

D. Chrenko “Introduction to Electric and Hybrid Vehicles”, in IEEE International Workshop Université Al-Ain, Abu-Dhabi, Février 2014, plenary lecture.

D. Chrenko, L. Le Moyne, E.-H. Aglzim, D. Bouquain, and A. Miraoui, “High temperature pem fuel cell system for small mobile applications,” in X Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrogeno : ”Energias Renovables”. Sociedad Mexicana del Hidrogeno, October 2010, plenary lecture.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La plupart d'entre nous sommes liés à sa voiture et même si les limitations de ce mode de transport sont connues, il est difficile d'en changer. Afin de pouvoir continuer à utiliser un véhicule personnel, il faut diminuer sa consommation d'énergie et sa production de polluants.

Une piste très prometteuse est de concevoir des véhicules hybrides qui combinent différentes sources et convertisseurs d'énergie dans le but d'utiliser chacun des composants de façon avantageuse avec un rendement maximisé (chapitre 1.2). Pour cela, les véhicules hybrides doivent être conçus et testés pas uniquement pour quelques cycles de conduite bien définis, mais pour la totalité des cycles qu'ils rencontrent pendant leur durée de vie (chapitre 2).

La gestion d'énergie dans les véhicules hybrides est cruciale pour surmonter les inconvénients liés à leur complexité (chapitre 3). Pour cela, on peut utiliser soit des méthodes à base de règles soit l'optimisation en temps réel qui peuvent toutes les deux fonctionner sans connaissance des cycles de conduite. Ces approches ont entre autre été appliqués durant la thèse de doctorat de Zainab ASUS (paragraphe 7.1.1.2) et la thèse de doctorat de Shiyu GAN (paragraphe 7.1.1.5). Dans ce cas, il est primordial que la régulation soit bien paramétrée et robuste. Une alternative plus prometteuse est une régulation grâce à une optimisation globale en connaissant les cycles de conduite, soit par expérience, soit en utilisant les données de planification de trajet, ce sujet est traité avec la thèse de doctorat de Loïc JOUD (paragraphe 7.1.1.4).

Afin de développer une gestion adaptée, il faut un modèle du système qui est assez précis pour permettre d'étudier l'influence des paramètres de commande et assez global pour fournir des résultats rapidement. La représentation énergétique macroscopique (REM) est choisie comme approche de modélisation la plus adaptée (chapitre 4), elle a été utilisée durant les thèses de doctorat de Zainab ASUS (paragraphe 7.1.1.2), Shiyu GAN (paragraphe 7.1.1.5) et Loïc JOUD (paragraphe 7.1.1.4).

Afin d'augmenter l'intérêt de la REM, il a été récemment décidé dans la thèse de doctorat de Shiyu GAN (paragraphe 7.1.1.5) de l'appliquer dans le contexte d'une programmation orientée objet (object oriented programming - OOP).

En dehors d'une optimisation globale, différentes approches peuvent être appliqués ; il est possible d'améliorer certains composants de façon individuelle (chapitre 5), notamment le moteur à combustion ou les batteries Lithium-ion. De plus, des aspects supplémentaires - négligés jusqu'à maintenant - comme le comportement du conducteur, les conditions météorologiques ou liées au trafic doivent faire partie de la gestion d'énergie. Cette partie a été abordée lors du stage de fin d'études de Baptiste VALET (paragraphe 7.1.3.1)

et durant le stage de Bachelor de Carlos DAMAS (paragraphe 7.1.3.2).

Les batteries Lithium-ion sont objet au vieillissement et doivent être intégrés dans le système pas uniquement de façon électrique, mais également de façon thermique. L'aspect du diagnostic du vieillissement des batteries Lithium-ion était l'objet de la thèse de doctorat de Christian SCHLASZA (paragraphe 7.3.1.1). Durant la thèse de doctorat de Zul Hilmi CHE DAUD les aspects d'intégration thermique des batteries Lithium-ion étaient étudiés (paragraphe 7.1.1.3). Il est également possible de remplacer le moteur thermique par un moteur électrique afin de pouvoir utiliser ce convertisseur d'énergie plus efficace et des vecteurs d'énergie possiblement moins polluants comme l'électricité (section 5.3) ou l'hydrogène (section 5.4).

Une autre perspective prometteuse est de prévoir un dispositif capable de valoriser l'énergie thermique perdue, par exemple en utilisant un moteur Stirling (section 6). Ce point a été traité lors de la thèse de doctorat de Juliette BERT (paragraphe 7.1.1.1).

Dans le futur, une intégration des connaissances des cycles de conduite, ainsi qu'une amélioration des méthodes d'optimisation en temps réel représenteront une avancée non négligeable. En outre, il est crucial que les approches étudiées théoriquement puissent être appliquées rapidement sur des véhicules grâce à des systèmes de prototypage rapide. Il est également important de se préoccuper des nouvelles technologies comme par exemple la pile à combustible qui remplacera le moteur à combustion.

Le projet scientifique présenté englobe un nombre considérable d'aspects qui sont tous liés à une amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules avec une priorité sur l'amélioration de la gestion d'énergie dans les véhicules hybrides. Il s'appuie sur les connaissances d'autres collègues et il est soutenu par six thèses de doctorats, trois mémoires de Master, deux mémoires de Bachelor et plusieurs projets de fin d'étude. Les coopérations industrielles et universitaires en France et à l'international montrent l'intérêt du sujet et sa reconnaissance dans le monde scientifique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] D. Chrenko, "Influence of hybridation on eco-driving habits using realistic driving cycles," IET Intelligent Transport Systems - Special Issue : Energy issues in transport systems and the role of ITS,
- [2] Z. Asus, D. Chrenko, E.-H. Aglzim, A. Kebairi, A. Keromnes, and L. Le Moyne, "Model and control strategy simulation of a racing series hybrid car," in IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference (VPPC),
- [3] Z. Asus, D. Chrenko, E.-H. Aglzim, A. Keromnes, and L. Le Moyne, "Simple method of estimating consumption of internal combustion engine for hybrid application," in ITEC,
- [4] BP, "Bp statistical review of world energy," <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>,
- [5] Earth System Research Laboratory - Global Monitoring Division, "Trends in atmospheric carbon dioxide," <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>,
- [6] NASA, "Global climate change," <http://climate.nasa.gov/>,
- [7] —, "Global climate change - the consequences of climate change," <http://climate.nasa.gov/effects/>,
- [8] World Carbon Project, "Global Carbon Atlas," <http://www.globalcarbonatlas.org/>,
- [9] Eurostat, "Green house gas emissions by sector," <http://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/tsdcc210>, 2016,
- [10] "Transportation green house gas emissions by sector," "
- [11] M. Zhang, "Hev powertrain fundamentals," in ITEC Short Course,
- [12] C. Ailloud, B. Delaporte, G. Schmitz, A. Keromnes, and L. Le Moyne, "Development and validation of a five stroke engine," SAE Technical Paper, vol. 24, p. 0095,
- [13] H. El Merhubi, A. Keromnes, G. Catalano, B. Lefort, and L. Le Moyne, "A high pressure experimental and numerical study of methane ignition," Fuel, vol. 177, pp. 164–172,
- [14] F. Badin, Les véhicules hybrides - Des composants au système.
- [15] A. Ivanco, Y. Chamailard, A. Charlet, and Hig, "Stratégies de gestion de l'énergie pour un moteur hybride pneumatique," "
- [16] A. Ravey, M. Dou, and A. Miraoui, "Control strategies for fuel-cell-based hybrid electric vehicles : From offline to online and experimental results," Vehicular Technology, IEEE Transactions on, vol. 61, no. 6, pp. 2452–2457,
- [17] JRC Scientific and Policy Reports, "Driving and parking patterns of european car drivers - a mobility survey," Report EUR 25627 EN,

- [18] Z. Asus, E.-H. Aglzim, D. Chrenko, Z. H. Che Daud, and L. Le Moyne, "Dynamic modeling and driving cycle prediction for a racing series hybrid car," *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics (JESTPE)*, vol. PP Issue 99, p. 1, 2013,
- [19] —, "Optimization of racing series hybrid electric vehicle using dynamic programming," 2014,
- [20] Z. Asus, E.-H. Aglzim, D. Chrenko, and L. Le Moyne, "Parametric design and sizing of a fuel cell hybrid electric racing car," in *FDFC*, Karlsruhe, Germany, April 2013,
- [21] Ingénieurs d'Automobile, "Le moteur de formule 1, un hybride innovant à haut rendement énergétique," No 828,
- [22] Z. Asus, "Modeling of control strategy of a series hev to optimize fuel consumption and substain battery charge," in *Conférence Jeunes Chercheurs en Génie Electrique*,
- [23] Wikipedia, "New european driving cycle," https://en.wikipedia.org/wiki/New_European_Driving_Cycle,
- [24] EPA - United States Environmental Protection Agency, "Federal test procedure revisions," <https://www3.epa.gov/otaq/sftp.htm>,
- [25] Dieselnet, "Japanese jc08 cycle," <https://www.dieselnet.com//standards/cycles/jp-jc08.php>,
- [26] M. André, "Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions - part a : The artemis european driving cycles," INRETS-LTE 0411,
- [27] UNECE, "World forum for harmonization of vehicle regulations - wp29," "
- [28] J. Demuynck, D. Bosteels, M. D. Paepe, C. Favre, J. May, and S. Verhelst, "Recommendations for the new wltc cycle based on an analysis of vehicle emission measurements on nedc and cadc," *Energy Policy*, vol. 49, no. 0, pp. 234 – 242, 2012,
- [29] Wikipedia, "Worldwide harmonized light vehicles test procedures," https://en.wikipedia.org/wiki/Worldwide_harmonized_Light_vehicles_Test_Procedures,
- [30] New York Times, "Explaining volkswagen's emissions scandal," http://www.nytimes.com/interactive/2015/business/international/vw-diesel-emissions-scandal-explained.html?_r=0,
- [31] D. Chrenko, I. Garcia Diez, and L. Le Moyne, "Artificial driving cycles for the evaluation of energetic needs for electric vehicles," in *iTEC*,
- [32] D. Chrenko, Z. H. Che Daud, Z. Asus, S. Gan, E.-H. Aglzim, and L. Le Moyne, "Sizing of ice and lithium-ion battery for series hybrid vehicle over life cycle with battery aging," in *iTEC*,
- [33] Commission of the European Communities, "Regulation (eec) no 4064/89," "
- [34] E. Ericsson, "Variability in urban driving patterns," *Transportation Research Part D*, vol. 5, pp. 337–354,
- [35] M. A. S. Kamal, M. Mukai, J. Murata, and T. Kawabe, "Ecological vehicle control on roads with up-down slopes," *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, vol. 12, no. 3, pp. 783–794,

- [36] C. Gutenkunst, D. Chrenko, R. Kriesten, P. Neugebauer, B. Jäger, and T. Giereth, "Route generation algorithm based on opensoopen data to predict energy consumption of different vehicles," in IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference VPPC,
- [37] D. Chrenko, A. Ravey, R. Roche, D. Bouquain, and A. Miraoui, "Autonomy estimation for ev based on road planning software," in IEEE Transportation Electrification Conference (iTEC),
- [38] S. R. Cikanek and K. Bailey, "Regenerative braking system for a hybrid electric vehicle," in American Control Conference, 2002. Proceedings of the 2002, vol. 4, 2002,
- [39] N. J. Schouten, M. A. Salman, and N. A. Kheir, "Energy mangement strategies for parallel hybrid vehicles using fuzzy logic," *Contron Engineering Practice*, vol. 11, pp. 171–177,
- [40] F. Berthold, B. Blunier, D. Bouquain, S. Williamson, and A. Miraoui, "Offline and on-line optimization of plug-in hybrid electric vehicle energy usage (home-to-vehicl and vehicle-to-home)," in Transportation Electrification Conference and Expo (iTEC).
- [41] L. Chang and M. Y. Lu, "Power management for plug-in hybrid electric vehicles using reinforced learning with trip information," in I2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo,
- [42] A. Lajunen, "Development of energy management strategy for plug-in hybrid city bus," in iTEC.
- [43] H. Turker, A. Hably, and S. Bacha, "Dynamic programming for optimal integration of plug-in hybrid electric vehicles (phevs) in residential electric grid areas," in IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2012,
- [44] S. G. Wirasingha and A. Emadi, "Classification and Review of Control Strategies for Plug-In Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 1, pp. 111–122,
- [45] A. Khaligh and Z. Li, "Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles : State of the Art," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 6, pp. 2806–2814,
- [46] P. Zhang, F. Yan, and C. Du, "A comprehensive analysis of energy management strategies for hybrid electric vehicles based on biometrics," *Renewable ans Sustainable Energy Reviews*, vol. 48, pp. 88 – 104,
- [47] D. Chrenko, S. Gan, C. Gutenkunst, R. Kriesten, and L. Le Moyne, "Novel classification of control strategies for hybrid electric vehicles," in IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference (VPPC),
- [48] C. Musardo, G. Rizzoni, Y. Guezennec, and B. Staccia, "A-ECMS : An Adaptive Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Energy Management," *European Journal of Control*, vol. 11, no. 4-5, pp. 509–524,
- [49] A. Chasse, G. Corde, A. D. Mastro, and D. Bois-préau, "Online optimal control of a parallel hybrid with after-treatment constraint integration," in Vehicular Power and Propulsion Conference (VPPC), Lille, France, October 2010,
- [50] A. Fröberg, J. slund, and L. Nielsen, "Optimal transient control of power generation in hybrid construction equipment," in Vehicular Power and Propulsion Conference, no. 3, Chicago IL, USA, October 2011,

- [51] J. Lescot, A. Sciarretta, Y. Chamailard, and A. Charlet, "On the integration of optimal energy management and thermal management of hybrid electric vehicles," 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp. 1–6,
- [52] T. Sutikno, N. R. N. Idris, and A. Jidin, "A review of direct torque control of induction motors for sustainable reliability and energy efficient drives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, pp. 548–558,
- [53] Z. Song, H. Hofmann, J. Li, J. Hou, X. Han, and M. Ouyang, "Energy management strategies comparison for electric vehicles with hybrid energy storage system," *Applied Energy*, vol. 134, pp. 321–331,
- [54] S. Grubwinkler, T. Brunner, and M. Lienkamp, "Range Prediction for EVs via Crowd-Sourcing," in *IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Coimbra, Portugal, October 2014,
- [55] D. Karbowski, N. Kim, and A. Rousseau, "Route-Based Online Energy Management of a PHEV and Sensitivity to Trip Prediction," in *IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Coimbra, Portugal, October 2014,
- [56] R. C. B. Sampaio, M. Becker, V. L. Lemos, A. A. G. Siqueira, J. Ribeiro, and G. A. P. Caurin, "Robust Control in 4x4 Hybrid-converted Touring Vehicles During Urban Speed Steering Maneuvers," in *Vehicular Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Lille, France, October 2010,
- [57] K. Daniel, B. Blunier, C. Zwyssig, and A. Miraoui, "Design and control of an ultra high speed turbo compressor for the Air Management of fuel cell systems," 2012 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), pp. 1–6,
- [58] Z. Chen, C. C. Mi, R. Xiong, J. Xu, and C. You, "Energy management of a power-split plug-in hybrid electric vehicle based on genetic algorithm and quadratic programming," *Journal of Power Sources*, vol. 248, pp. 416–426,
- [59] C. Lin, Z. Filipi, Y. Wang, L. Louca, H. Peng, D. Assanis, and J. Stein, "Integrated, feed-forward hybrid electric vehicle simulation in SIMULINK and its use for power management studies," *SAE Paper*, no. 2001-01-1334,
- [60] C. Lin, H. Peng, J. Grizzle, and J. Kang, "Power management strategy for a parallel hybrid electric truck," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 11, no. 6, pp. 839–850,
- [61] Q. Gong, Y. Li, and Z. Peng, "Trip based optimal power management of plug-in hybrid electric vehicles using gas-kinetic traffic flow model," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 6, pp. 3393–3401,
- [62] —, "Trip based power management of plug-in hybrid electric vehicle with two-scale dynamic programming," in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. IEEEXplore*, September 2007,
- [63] —, "Power management of plug-in hybrid electric vehicles using neural network based trip modeling," in *American Control Conference. IEEEXplore*, June 2009,
- [64] C. Lin, H. Peng, and J. Grizzle, "A stochastic control strategy for hybrid electric vehicles," in *American Control Conference*, vol. 5. *IEEEXplore*, July 2004,
- [65] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay, and A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*, C. Press, Ed.,
- [66] S. Moura, H. Fathy, D. Callaway, and J. Stein, "A stochastic optimal control approach for power management in plug-in hybrid electric vehicles," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 19, no. 3, pp. 545–555,

- [67] D. Opila, X. Wang, R. McGee, R. Gillespie, J. A. Cook, and J. Grizzle, "An energy management controller to optimally trade off fuel economy and drivability for hybrid vehicles," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, no. 99, pp. 1–16,
- [68] J. Bonnans, T. Guilbaud, A. Cherif, D. von Wissel, C. Sagastizábal, and H. Zidani, "Parametric optimization of hybrid car engines," *Optimisation and Engineering*, Springer, vol. 5, no. 4, pp. 395–415,
- [69] B. Lunz, H. Walz, and D. U. Sauer, "Optimizing vehicle-to-grid charging strategies using genetic algorithms under the consideration of battery aging," *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1–7,
- [70] M. Montazeri-Gh, A. Poursamad, and B. Ghalichi, "Application of genetic algorithm for optimization of control strategy in parallel hybrid electric vehicles," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 343, no. 4-5, pp. 420–435,
- [71] F. Hu and Z. Zhao, "Optimization of control parameters in parallel hybrid electric vehicles using a hybrid genetic algorithm," *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1–6,
- [72] S. Touati, R. Ibtouen, O. Touhami, and a. Djerdir, "Fast multi objective optimization of an automotive PMSM using mixed BEM with genetic algorithms," *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, no. 1, pp. 1–4,
- [73] M. Sorrentino, G. Rizzo, and I. Arsie, "Analysis of a rule-based control strategy for on-board energy management of series hybrid vehicles," *Control Engineering Practice*, vol. 19, no. 12, pp. 1433–1441,
- [74] B.-C. Chen, Y.-Y. Wu, and H.-C. Tsai, "Design and analysis of power management strategy for range extended electric vehicle using dynamic programming," *Applied Energy*, vol. 113, pp. 1764–1774,
- [75] L. V. Pérez, G. R. Bossio, D. Moitre, and G. O. García, "Optimization of power management in an hybrid electric vehicle using dynamic programming," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 73, no. 1-4, pp. 244–254,
- [76] P. Jiankun, "Study on Energy Management Strategies for Series-parallel Plug-in Hybrid Electric Bus," in *IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Coimbra, Portugal, October 2014,
- [77] S. Delprat and T. Hofman, "Hybrid vehicle optimal control : linear interpolation and singular control," in *IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Coimbra, Portugal, October 2014,
- [78] M. Ehsani, "Sensitivity analysis of vehicle performance to transmission parameters in parallel HEVs with dynamic programming optimization," *2012 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, pp. 1–5,
- [79] Z. Li, A. Khaligh, and N. Sabbaghi, "Minimum Charging-Cost Tracking Based Optimization Algorithm with Dynamic Programming Technique for Plug-In Hybrid Electric Vehicles," in *Vehicular Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Chicago IL, USA, October 2011,
- [80] L. Wang, Y. Zhang, C. Yin, H. Zhang, and C. Wang, "Hardware-in-the-loop simulation for the design and verification of the control system of a series/parallel hybrid electric city-bus," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 25, pp. 148–162,
- [81] S. Kutter and B. Bäker, "An Iterative Algorithm for the Global Optimal Predictive Control of Hybrid Electric Vehicles," in *Vehicular Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Chicago IL, USA, October 2011,

- [82] C. Romaus, K. Gathmann, and J. Böcker, "Optimal Energy Management for a Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles Based on Stochastic Dynamic Programming," in Vehicular Power and Propulsion Conference (VPPC), Lille, France, October 2010,
- [83] J. Liu and H. Peng, "Modeling and control of a power-split hybrid vehicle," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 16, no. 6, pp. 1242–1251,
- [84] A. Moawad, N. Kim, N. Shidore, and A. Rousseau, "Assessment of vehicle sizing, energy consumption, and cost through large-scale simulation of advanced vehicle technologies," Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, Tech. Rep.,
- [85] "Noao, vehicule electrique avec prolongateur d'autonomie. Pole de la Performance Nevers Magny-Cours," "
- [86] Circuit Magny Cours, "Pistes et pilotage, la piste Grand Prix," "
- [87] F. Rodriguez, "Ppnmc range extender control documentation," TMG, Magny Cours, Nevers, France, Tech. Rep.,
- [88] L. Guzzella and A. Sciarretta, Vehicle Propulsion Systems - Introduction to Modeling and Optimization.
- [89] D. Chrenko and L. Boulon, "Energetic macroscopic representation (emr) of a fuel cell system (fcs) for electric vehicles (ev)," in International Workshop, "Modelling and control for electrical systems", A. Bouscayrol, Ed.,
- [90] C. C. Chan, A. Bouscayrol, and K. Chen, "Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles : Architectures and modeling," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 59, no. 2, pp. 589–598,
- [91] L. I. Silva, a. Bouscayrol, and C. H. De Angelo, "Modeling and control of an electric vehicle combining bond graph and Energetic Macroscopic Representation," 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, no. 4, pp. 973–977,
- [92] K. Chen, A. Bouscayrol, P. Delarue, A. Berthon, A. Architectures, and V. Drivetrains, "Simulation of an Unified Control Scheme for Different Hybrid Electric Vehicles," pp. 3842–3847,
- [93] A. Bouscayrol, B. Davat, B. de Fornel, B. Francois, J. Hautier, F. Meibody-Tabar, E. Monmasson, M. Pietrzak-David, H. Razik, E. Semail, and F. Benkhoris, "Control structures for multi-machine multi-converter systems with upstream coupling," Mathematics and Computers in Simulation, vol. 63, no. 63, pp. 261–270,
- [94] D. Chrenko, J. Coulié, M.-C. Péra, and D. Hissel, "Static and dynamic modeling of a diesel fuel processing unit for polymer electrolyte fuel cell supply," Internaltional Journal of Hydrogen Energy, vol. 34, pp. 1324–1335,
- [95] K. Chen, A. Bouscayrol, and W. Lhomme, "Energetic macroscopic representation and inversion based control : Application to an electric vehicle with an electrical differential," Journal of Asian Electric Vehicles, vol. 6, no. 1, pp. 1097 – 1102,
- [96] Y. Cheng, K. Chen, C. Chan, A. Bouscayrol, and S. Cui, "Global modeling and control strategy simulation," IEEE Vehicular Technology Magazine, pp. 73 – 79,
- [97] K. Chen, A. Bouscayrol, A. Berthon, P. Delarue, D. Hissel, and R. Trigui, "Global modeling of different vehicles," IEEE Vehicular Technology Magazine, pp. 80 – 89,
- [98] A. Bouscayrol, W. Lhomme, P. Delarue, B. Lemaire-Semail, and S. Aksas, "Hardware-in-the-loop simulation of electric vehicle traction systems using energetic macroscopic representation," in 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics,

- [99] W. Lhomme, A. Bouscayrol, and P. Barrade, "Simulation of a series hybrid electric vehicle based on energetic macroscopic representation," in IEEE International Symposium on Industrial Electronics,
- [100] J. S. Martínez, D. Hissel, M.-C. Péra, and M. Amiet, "Practical control structure and energy management of a testbed hybrid electric vehicle," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 60, no. 9, pp. 4139–4152,
- [101] A.-L. Allègre, R. Trigui, and A. Bouscayrol, "Flexible real-time control of a hybrid energy storage system for electric vehicles," IET Electrical Systems in Transportation, vol. 3, no. 3, pp. 79–85,
- [102] A. E. Fitzgerald, C. J. Kingsley, and S. D. Umans, Electric Machinery, 6th edition, Ed.
- [103] S. A. Evangelou and A. Shukla, "Advances in the modelling and control of series hybrid electric vehicles," in American Control Conference, Montreal, Canada, June 2012,
- [104] L. Horrein, A. Bouscayrol, and M. El-Fassi, "Thermal energetic model of an internal combustion engine for simulation of a thermal vehicle," in IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference,
- [105] D. Ambühl and L. Guzzella, "Predictive reference signal generator for hybrid electric vehicles," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 58, no. 9, pp. 4730–4740,
- [106] O. Sundstrom, L. Guzzella, and P. Soltic, "Optimal hybridization in two parallel hybrid electric vehicles using dynamic programming," in The International Federation of Automatic Control.
- [107] V. Sezer, M. Gokasan, and S. Bogosyan, "A novel ECMS and combined cost map approach for high-efficiency series hybrid electric vehicles," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 60, no. 8, pp. 3557–3570,
- [108] M. Koot, J. Kessels, B. de Jager, W. Heemels, P. van-den Bosch, and M. Steinbuch, "Energy management strategies for vehicular electric power systems," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 54, no. 3, pp. 771–782,
- [109] L. V. Perez, G. R. Bossio, D. Moitre, and G. O. Garcia, "Optimization of power management in an hybrid electric vehicle using dynamic programming," Mathematics and Computers in Simulation, vol. 73, pp. 244–254,
- [110] O. Sundstrom and L. Guzzella, "A generic dynamic programming matlab function," in 18th IEEE International Conference on Control Applications. Saint Petersburg, Russia : IEEEExplore, July 2009,
- [111] M. Corno, D. Berretta, P. Spagnol, and S. M. Savaresi, "Design, control, and validation of a charge-sustaining parallel hybrid bicycle," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 24, no. 3, pp. 817–829,
- [112] D. Chrenko, E.-H. Aglzim, D. Bouquain, L. Le Moyne, and A. Miraoui, "Design and modeling of a hybrid scooter, containing a high temperature pem fuel cell system and lithium ion battery," in H2 Expo.
- [113] C. Zheng, G. Xu, J. Jeong, and S. W. Cha, "A Power Management Strategy for Hybrid Buses Using Measured Driving Route Information," in IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference (VPPC). Coimbra, Portugal : IEEE, October 2014,

- [114] D. Chrenko, F. Gao, B. Blunier, D. Bouquain, and A. Miraoui, "Methanol fuel processor and pem fuel cell modeling for mobile application," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 13, pp. 6863–6871,
- [115] A. Sripakagorn and N. Limwuthigraijirat, "Experimental assessment of fuel cell/supercapacitor hybrid system for scooters," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, pp. 6036–6044,
- [116] D. Mazumdar, S. Das, N. P. Rao, A. Sivakumar, and S. J. Dhinagar, "Development of 48 V Starting Systems for a Two Wheeler Parallel Hybrid," in *2015 IEEE INTERNATIONAL TRANSPORTATION ELECTRIFICATION CONFERENCE (ITEC)*. IEEE, 2015,
- [117] X. Hu, N. Murgovski, L. Johannesson, and B. Egardt, "Energy efficiency analysis of a series plug-in hybrid electric bus with different energy management strategies and battery sizes," *Applied Energy*, vol. 111, pp. 1001 – 1009,
- [118] S. Williamson, S. Wirasingha, and A. Emadi, "Comparative investigation of series and parallel hybrid electric drive trains for heavy-duty transit bus applications," in *Vehicle Power and Propulsion Conference*. IEEEExplore, September 2006,
- [119] A. Lajunen, "Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city busses," *Transportation Research Part C*, vol. 38, p. 15,
- [120] X. Wu and J. Chen, "Parallel Hybrid Electric Bus in Different Chinese Urban Driving Cycle," in *IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Coimbra, Portugal, October 2014,
- [121] Y. L. Jonathan Nzisabira and P. Duysinx, "Comparison of ultra capacitors, hydraulic accumulators and batteries technologies to optimize hybrid vehicle ecoefficiency," in *Power Engineering, Energy and Electrical Devices*. IEEEExplore, March 2009,
- [122] J. Burton, K. Walkowicz, P. Sindler, and A. Duran, "In-use and vehicle dynamometer evaluation and comparison of class 7 hybrid electric conventional diesel delivery trucks," in *SAE 2013 Commercial Vehicle Engineering Congress*,
- [123] J. Stoev, E. Hostens, and S. Vandenplas, "Driver Modeling for Heavy Hybrid Vehicle Energy Management," in *IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Coimbra, Portugal, October 2014,
- [124] K. Bayindir, M. Gozukucuk, and A. Teke, "A comprehensive overview of hybrid electric vehicle : Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 2, pp. 1305–1313,
- [125] D. Chrenko, S. Gan, P. Boulliot, and L. Le Moyne, "Multi-architecture / multi-application modelling approach for hybrid electric vehicle using energetic macroscopic representation," in *SESDE*,
- [126] M. Pacheco, E. Alva, R. Valdivia, J. Pacheco, C. Rivera, A. Santana, J. Huertas, B. Lefort, and N. Estrada, "Removal of main exhaust gases of vehicles by a double dielectric barrier discharge," *Journal of Physics : Conference Series*, vol. 370, no. 1, p. 012023,
- [127] L. Le Moyne, "Trends in atomization theory," *international Journal of Spray and combustion dynamics*, vol. 2, no. 1, pp. 49 – 84,
- [128] E.-H. Aglizim, M. Bin Jamaluddin, D. Chrenko, and A. Rouane, "Impedance spectrometer modelling in matlab/simulink for measuring the complex impedance of a fuel cell - eis method," in *International Conference on Informatics, Environment, Energy and Applications*,

- [129] A. Keromnes, B. Delaporte, G. Schmitz, and L. Le Moyne, "Development and validation of 5 stroke engine for range extenders application," *Energy Conversion and Management*, vol. 82, pp. 259–267,
- [130] J. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*.
- [131] S. Han, T. Chung, T. Kwon, and S. Lee, "Empirical formula for instantaneous heat transfer coefficient in s.i. engine," *SAE Paper*, vol. 972995,
- [132] I. Vibe, *Brennverlauf und Kreisprozess von Verbrennungsmotoren*.
- [133] M. Sivak and B. Schoettle, "Eco-driving : Strategic, tactical, and operational decisions of the driver that influence vehicle fuel economy," *Transport Policy*, vol. 22, pp. 96 – 99,
- [134] M. Daboussy, D. Chrenko, E.-H. Aglzim, Z. H. Che Daud, and L. Le Moyne, "Characterisation of a commercial automotive lithium ion battery using extended kalman filter," in *IEEE Transportation Electrification Conference*,
- [135] D. Andre, C. Appel, T. Soczka-Guth, and D. U. Sauer, "Advanced mathematical methods of SOC and SOH estimation for lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 224, pp. 20–27,
- [136] W.-Y. Chang, "Estimation of the state of charge for a LFP battery using a hybrid method that combines a RBF neural network, an OLS algorithm and AGA," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 53, pp. 603–611,
- [137] H. Dai, X. Wei, Z. Sun, J. Wang, and W. Gu, "Online cell SOC estimation of Li-ion battery packs using a dual time-scale Kalman filtering for EV applications," *Applied Energy*, vol. 95, pp. 227–237,
- [138] H. He, R. Xiong, and H. Guo, "Online estimation of model parameters and state-of-charge of LiFePO₄ batteries in electric vehicles," *Applied Energy*, vol. 89, no. 1, pp. 413–420,
- [139] Y. He, X. Liu, C. Zhang, and Z. Chen, "A new model for State-of-Charge (SOC) estimation for high-power Li-ion batteries," *Applied Energy*, vol. 101, pp. 808–814,
- [140] J. Kim and B. H. Cho, "State-of-Charge Estimation and State-of-Health Prediction of a Li-Ion Degraded Battery Based on an EKF Combined With a Per-Unit System," *IEEE Transaction on Vehicular Technilogy*, vol. 60, no. 9, pp. 4249–4260,
- [141] M. Mastali, J. Vazquez-Arenas, R. Fraser, M. Fowler, S. Afshar, and M. Stevens, "Battery State of the Charge Estimation Using Kalman Filtering," *Journal of Power Sources*, vol. 239, pp. 294–307,
- [142] M. A. Roscher, S. Member, O. S. Bohlen, and D. U. Sauer, "Reliable State Estimation of Multicell Lithium-Ion Battery Systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 3, pp. 737–743,
- [143] L. Y. Wang, M. P. Polis, L. S. Member, G. G. Yin, W. Chen, Y. Fu, and C. C. Mi, "Battery Cell Identification and SOC Estimation Using String Terminal Voltage Measurements," vol. 61, no. 7, pp. 2925–2935,
- [144] A. Zenati, P. Desprez, and H. Razik, "Estimation of the SOC and the SOH of Li-ion Batteries , by combining Impedance Measurements with the Fuzzy Logic Inference," in *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2010,

- [145] S. Luciano and J. C. Viera, "Online SOC estimation of Li-FePO₄ batteries through a new fuzzy rule-based recursive filter with feedback of the heat flow rate," in IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference (VPPC), Coimbra, Portugal, October 2014,
- [146] C. Lin, K. Chen, F. Sun, P. Tang, and H. Zhao, "Research on thermo-physical properties identification and thermal analysis of ev li-ion battery," IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion (VPPC), pp. 1643–1648,
- [147] C. Sen and N. Kar, "Battery pack modeling for the analysis of battery management system of a hybrid electric vehicle," in Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE, 2009,
- [148] S. Chacko and Y. M. Chung, "Thermal modelling of li-ion polymer battery for electric vehicle drive cycles," *Journal of Power Sources*, vol. 213, pp. 296–303,
- [149] A. Awarke, M. Jaeger, O. Oezdemir, and S. Pischinger, "Thermal analysis of a li-ion battery module under realistic ev operating conditions," *International Journal of Energy Research*, vol. 37, pp. 617 – 630,
- [150] J. P. Schmidt, S. Arnold, A. Loges, D. Werner, T. Wetzel, and E. Ivers-Tiffée, "Measurement of the internal cell temperature via impedance : evaluation and application of a new method," *Journal of Power Sources*, vol. 243, pp. 110–117,
- [151] N. Watrin, R. Roche, H. Ostermann, B. Blunier, and A. Miraoui, "Multiphysical Lithium-Based Battery Model for Use in State-of-Charge Determination," *Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 8, pp. 3420–3429,
- [152] Z. H. Che Daud, D. Chrenko, F. Dos Santos, E.-H. Aglzim, A. Keromnes, and L. Le Moyne, "3d electro-thermal modelling and experimental validation of lithium polymer based batteries for automotive applications," *International Journal of Energy Research*, 2016,
- [153] M. Knowles, "Through-life Management of Electric Vehicles," *Procedia CIRP*, vol. 11, pp. 260–265,
- [154] C. Schlasza, P. Ostertag, D. Chrenko, R. Kriesten, and D. Bouquain, "Review on the aging mechanisms in li-ion batteries for electric vehicles based on the fmea method," in IEEE Transportation Electrification Conference (iTEC),
- [155] J. Li, J. Zhang, X. Zhang, C. Yang, N. Xu, and B. Xia, "Study of the storage performance of a Li-ion cell at elevated temperature," *Electrochimica Acta*, vol. 55, no. 3, pp. 927–934,
- [156] Y.-H. Sun, H.-L. Jou, and J.-C. Wu, "Auxiliary diagnosis method for lead acid battery health based on sample entropy," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 9, pp. 2250–2256,
- [157] G. Jin, D. E. Matthews, and Z. Zhou, "A Bayesian framework for on-line degradation assessment and residual life prediction of secondary batteries in spacecraft," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 113, pp. 7–20,
- [158] R. Hein, P. R. Kleindorfer, and S. Spinler, "Valuation of electric vehicle batteries in vehicle-to-grid and battery-to-grid systems," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 79, no. 9, pp. 1654–1671,
- [159] L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua, and M. Ouyang, "A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles," *Journal of Power Sources*, vol. 226, no. 0, pp. 272–288,

- [160] K. B. Hatzell, A. Sharma, and H. K. Fathy, "A Survey of Long-Term Health Modeling, Estimation, and Control of Lithium-Ion Batteries : Challenges and Opportunities," in American Control Conference.
- [161] G. L. Plett, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs - Part 3," *Journal of Power Sources*, vol. 134, no. 2, pp. 277–292,
- [162] B. Bhangu, P. Bentley, D. Stone, and C. Bingham, "Nonlinear Observers for Predicting State-of-Charge and State-of-Health of Lead-Acid Batteries for Hybrid-Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 54, no. 3, pp. 783–794,
- [163] U. Tröltzsch, O. Kanoun, and H.-R. Tränkler, "Characterizing aging effects of lithium ion batteries by impedance spectroscopy," *Electrochimica Acta*, vol. 51, no. 8-9, pp. 1664–1672,
- [164] Y. Hu, S. Yurkovich, Y. Guezennec, and B. Yurkovich, "Electro-thermal battery model identification for automotive applications," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 1, pp. 449–457,
- [165] K. Tsang and W. Chan, "State of health detection for Lithium ion batteries in photovoltaic system," *Energy Conversion and Management*, vol. 65, pp. 7–12,
- [166] F. Herb, "Alterungsmechanismen in Lithium-Ionen-Batterien und PEM-Brennstoffzellen und deren Einfluss auf die Eigenschaften von daraus bestehenden Hybrid-Systemen," Ph.D. dissertation, Universität Ulm,
- [167] M. Montaru, "Contribution à l'évaluation du vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les véhicules selon leurs usages," PhD thesis, L'institut Polytechnique de Grenoble,
- [168] Q. Badey, "Quentin Badey Étude des mécanismes et modélisation du vieillissement des batteries lithium-ion dans le cadre d'un usage automobile," PhD thesis, Université Paris Sud,
- [169] J. Groot, "State-of-Health Estimation of Li-ion Batteries : Cycle Life Test Methods," Licentiate Thesis (Master/PhD), Chalmers University of Technology Göteborg, Sweden,
- [170] J. Vetter, P. Novák, M. Wagner, C. Veit, K.-C. Möller, J. Besenhard, M. Winter, M. Wohlfahrt-Mehrens, C. Vogler, and a. Hammouche, "Ageing mechanisms in lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 147, no. 1-2, pp. 269–281,
- [171] J. W. Braithwaite, A. Gonzales, G. Nagasubramanian, S. J. Lucero, D. E. Peebles, J. A. Ohlhausen, and W. R. Cieslak, "Corrosion of Lithium-Ion Battery Current Collectors," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 146, no. 2, p. 448,
- [172] V. Agubra and J. Fergus, "Lithium Ion Battery Anode Aging Mechanisms," *Materials*, vol. 6, no. 4, pp. 1310–1325,
- [173] P. Verma, P. Maire, and P. Novák, "A review of the features and analyses of the solid electrolyte interphase in Li-ion batteries," *Electrochimica Acta*, vol. 55, no. 22, pp. 6332–6341,
- [174] D. Doughty and E. P. Roth, "A General Discussion of Li Ion Battery Safety," *The Electrochemical Society - Interface*, pp. 37–44,
- [175] D. Lisbona and T. Snee, "A review of hazards associated with primary lithium and lithium-ion batteries," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 89, no. 6, pp. 434–442,

- [176] X. Zhang, B. Winget, M. Doeff, J. W. Evans, and T. M. Devine, "Corrosion of Aluminum Current Collectors in Lithium-Ion Batteries with Electrolytes Containing LiPF₆," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 152, no. 11, p. B448,
- [177] S. Ramdon and B. Bhushan, "High resolution morphology and electrical characterization of aged Li-ion battery cathode." *Journal of colloid and interface science*, vol. 380, no. 1, pp. 187–91,
- [178] S. a. Channagiri, S. C. Nagpure, S. Babu, G. J. Noble, and R. T. Hart, "Porosity and Phase Fraction Evolution with Aging in Lithium Iron Phosphate Battery Cathodes," *Journal of Power Sources*, vol. 243, pp. 750–757,
- [179] S. Bourlot, P. Blanchard, and S. Robert, "Investigation of aging mechanisms of high power Li-ion cells used for hybrid electric vehicles," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 16, pp. 6841–6846,
- [180] M. Dubarry and B. Y. Liaw, "Identify capacity fading mechanism in a commercial LiFePO₄ cell," *Journal of Power Sources*, vol. 194, no. 1, pp. 541–549,
- [181] M. Koltypin, D. Aurbach, L. Nazar, and B. Ellis, "On the Stability of LiFePO₄ Olivine Cathodes under Various Conditions (Electrolyte Solutions, Temperatures)," *Electrochemical and Solid-State Letters*, vol. 10, no. 2, p. A40,
- [182] M. Kassem, J. Bernard, S. Revel, R. ant Pélissier, F. Duclaud, and C. Delacourd, "Calendar aging of a graphite/lifepo₄ cell," *Journal of Power Sources*, vol. 208, pp. 296–305,
- [183] K. Zaghib, M. Dontigny, P. Charest, J. Labrecque, a. Guerfi, M. Kopec, a. Mauger, F. Gendron, and C. Julien, "Aging of LiFePO₄ upon exposure to H₂O," *Journal of Power Sources*, vol. 185, no. 2, pp. 698–710,
- [184] M. Cuisinier, J.-F. Martin, N. Dupré, A. Yamada, R. Kanno, and D. Guyomard, "Moisture driven aging mechanism of LiFePO₄ subjected to air exposure," *Electrochemistry Communications*, vol. 12, no. 2, pp. 238–241,
- [185] T. Kawamura, S. Okada, and J.-i. Yamaki, "Decomposition reaction of LiPF₆-based electrolytes for lithium ion cells," *Journal of Power Sources*, vol. 156, no. 2, pp. 547–554,
- [186] S.-j. Park, J.-h. Song, H.-y. Choi, M.-l. Lee, Y.-k. Kong, and J.-g. Bin, "A study on design of inverter for multi-phase brushless DC ship propulsion motor," *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1–5,
- [187] B. Wu, Y. Ren, and N. Li, "LiFePO₄ Cathode Material," in *Electric Vehicles - The Benefits and Barriers*, S. Soylu, Ed.
- [188] M. Brousselya, P. Biensanb, F. Bonhommeb, P. Blanchardb, S. Herreyreb, K. Nechevc, and R. Staniewicz, "Main aging mechanisms in Li ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 146, pp. 90–96,
- [189] S. S. Zhang, "A review on the separators of liquid electrolyte Li-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 164, no. 1, pp. 351–364,
- [190] V. F. Lvovich, *Impedance Spectroscopy : Applications to Electrochemical and Dielectric Phenomena*, 1st ed.
- [191] C. J. Orendorff, "The Role of Separators in Lithium-Ion Cell Safety," *The Electrochemical Society - Interface*,

- [192] F. Gao, B. Blunier, and A. Miraoui, "A multiphysic dynamic 1d model of a proton exchange membrane fuel cell stack for real time simulation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009,
- [193] R. G. Samikannu Ramesh, E.-H. Aglzim, D. Chrenko, and L. Le Moyne, "Adaption of multi-physics pem fuel cell model using sensitivity analysis," in *SESDE*, 2014,
- [194] J. M. Correa, F. Borello, and M. Santarelli, "Sensitivity analysis of temperature uncertainty in aircraft pem fuel cell," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, pp. 14 745 – 14 758,
- [195] J. M. Correa, F. A. Farret, V. A. Popov, and M. G. Simoes, "Sensitivity analysis of the modeling parameters used in simulation of proton exchange membrane fuel cells," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, pp. 211 – 218,
- [196] Y. Huangfu, F. Gao, A. Abbas-Turki, D. Bouquain, and A. Miraoui, "Transient dynamic and modeling parameter sensitivity analysis of 1d solid oxide fuel cell model," *Energy Conversion and Management*, vol. 71, pp. 172 – 185,
- [197] S. J. Andreasen, L. Ashworth, I. N. M. Remón, and S. K. Kaer, "Directly connected series coupled htpem fuel cell stacks to a li-ion battery dc bus for a fuel cell electrical vehicle," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, pp. 7137–7145,
- [198] Y. Wu, E. Breaz, F. Gao, and A. Miraoui, "A Modified Relevance Vector Machine for PEM Fuel-Cell Stack Aging Prediction," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, vol. 52, no. 3, pp. 2573–2581, MAY-JUN 2016,
- [199] J. Vazquez, M. A. Sanz-Bobi, R. Palacios, and A. Arenas, "State of the art of thermoelectric generators based on heat recovered from the exhaust gases of automobiles," in *7th European Workshop on Thermoelectrics*, vol. 17,
- [200] D. Wei, X. Lu, Z. Lu, and J. Gu, "Dynamic modeling and simulation of an organic rankine cycle (orc) system for waste heat recovery," *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, pp. 1216–1224,
- [201] Y. Glavatskaya, G. Olivier, O. F. Shonda, and P. Podevin, "Heat recovery systems for passengers vehicles," in *Congrès CAR 2011*,
- [202] T.-C. Hung, "Waste heat recovery of organic rankine cycle using dry fluids," *Energy Conversion and Management*, vol. 42, pp. 539–553,
- [203] B. Kongtragool and S. Wongwises, "A review of solar-powered stirling engines and low temperature differential stirling engines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 7, pp. 131–154,
- [204] D. G. Thombare and S. K. Verma, "Technological development in the stirling cycle engines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, pp. 1–38,
- [205] R. Stirling, "Uk patent n°4081," "
- [206] M. Alaphilippe, S. Bonnet, J. Castaing-Lasvignottes, and P. Stouffs, "Dimensionnement d'un système de conversion thermodynamique de l'énergie solaire basé sur une machine alternative à cycle de joule," in *12èmes journées Internationales de Thermiques*,
- [207] J. Boucher, F. Lanzetta, and P. Nika, "Optimization of a dual free piston stirling engine," *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, pp. 802 – 811,
- [208] A. Sari, "Conception d'un groupe électrogène de faible puissance utilisant un moteur stirling et un alternateur linéaire," Ph.D. dissertation, UFR des Sciences, Techniques et Gestion de l'Industrie de l'Université de Franche-Comté,

- [209] D. A. Trayser and J. A. Eibling, "A 50-watt portable generator employing a solar-powered stirling engine," *Solar Energy*, vol. 11, no. 3 - 4, pp. 153 – 159,
- [210] V. N. Orlov and R. S. Berry, "Power output from an irreversible heat engine with a nonuniform working fluid," *Physical Review A*, vol. 42, no. 12, pp. 7230–7235,
- [211] B. Agnew, A. Alikitiwi, A. Anderson, E. Fisher, and I. Potts, "A finite time analysis of combined carnot driving and cooling cycles optimised for maximum refrigeration effect with applications to absorption refrigeration systems," *Exergy, an International Journal*, vol. 2, pp. 186 – 191,
- [212] M. Feidt, M. Costea, C. Petre, and S. Petrescu, "Optimization of the direct carnot cycle," *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, pp. 829 – 839,
- [213] L. F. Shampine, M. W. Reichelt, and J. Kierzenka, "Solving index-1 daes in matlab and simulink," *SIAM Review*, vol. 41, pp. 538 – 552,
- [214] L. F. Shampine and M. E. Hosea, "The matlab ode suite," *SIAM Journal on Scientific Computing*, vol. 18, pp. 1 – 22,
- [215] F. Formosa and L. G. Frechette, "Scaling laws for free piston stirling engine design : Benefits and challenges of miniaturization," *Energy*, vol. 57, pp. 796 – 808,
- [216] J. Bert, D. Chrenko, T. Sophy, L. Le Moyne, and F. Sirot, "Zero dimensional finite-time thermodynamic, three zones numerical model of a generic stirling and its experimental validation," *Renewable Energy*, vol. 47, pp. 167 – 174,
- [217] S. Seghir-Ouali, D. Saurya, S. Harmand, O. Phillipart, and D. Laloy, "Convective heat transfer inside a rotating cylinder with an axial air flow," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 46, pp. 1166 – 1178,
- [218] P. Guibert, "Moteur à allumage commandé," *Techniques de l'ingénieur*, p. BM 2 511,
- [219] K. T. Yun, H. Cho, R. Luck, and P. J. Mago, "Modeling of reciprocating internal combustion engines for power generation and heat recovery," *Applied Energy*, no. 0, pp. –,
- [220] F. P. Incropera and D. P. De Witt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 4th ed.
- [221] A. Burcat and B. Ruscic, *Third Millennium Ideal Gas and Condensed Phase Thermochemical Database for Combustion with Updates from Active Thermochemical Tables*, ARGONNE National Laboratory, TACHNION Isreal Institute of Technology,
- [222] J. Bert, D. Chrenko, T. Sophy, L. Le Moyne, and F. Sirot, "A numerical optimisation of a stirling engine," in *Congrès CAR 2011*,
- [223] —, "Simulation, experimental validation and kinematic optimization of a stirling engine using air and helium," *Energy*, vol. 78, pp. 701 – 712,
- [224] R. Eberhart and J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory," in *Micro Machine and Human Science, 1995. MHS '95., Proceedings of the Sixth International Symposium on.* IEEE, Octobre 1995,
- [225] H. Solmaz and H. Karabulut, "Performance comparison of a novel configuration of beta-type stirling engines with rombic drive engine," *Energy Conversion and Management*, vol. 78, pp. 627 – 633,
- [226] J. Bert, D. Chrenko, T. Sophy, L. Le Moyne, and F. Sirot, "Optimisation thermodynamique en temps fini d'une cinématique de moteur stirling," in *Cofret 12*,
- [227] Z. Asus, E.-H. Aglzim, D. Chrenko, and L. Le Moyne, "Fuel consumption evaluation of a hybrid electric car over aggressive cycles for thermal engine optimization," *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 2017,

- [228] Z. Asus, E.-H. Aglzim, D. Chrenko, Z. H. Che Daud, and L. Le Moyne, "Optimization of racing series hybrid electric vehicle using dynamic programming," in SESDE. Athens, Greece : IEEE, September 2013,
- [229] Z. H. Che Daud, D. Chrenko, E.-H. Aglzim, A. Keromnes, and L. Le Moyne, "Experimental study of lithium-ion battery thermal behaviour for electric and hybrid electric vehicles," in IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference VPPC, Combeira, Portugal, October 2014,
- [230] Z. H. Che Daud, D. Chrenko, F. Dos Santos, E.-H. Aglzim, and L. Le Moyne, "Electro-thermal simulation of lithium ion batteries for electric and hybrid vehicles," in SESDE.
- [231] D. Chrenko, I. Garcia Diez, D. Bouquain, L. Le Moyne, and A. Miraoui, "An energy and power based approach toward design of power split for urban hybrid vehicle," in IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference.
- [232] E.-H. Aglzim, A. M. B. Jamaluddin, and D. Chrenko, "Impedance spectrometer modelling in matlab/simulink for measuring the complex impedance of a fuel cell - eis method," *Journal of Clean Energy Technologies*, vol. 1, pp. 255–259,
- [233] F. Gao, D. Chrenko, B. Blunier, D. Bouquain, and A. Miraoui, "Multi-rates fuel cell emulation with spatial reduced real-time fuel cell modelling," *Transactions on Industry Applications*, vol. 48, pp. 1127 – 1135, 2012,
- [234] D. Chrenko, S. Lecoq, E. Herail, M.-C. Péra, and D. Hissel, "Model based control of a diesel supplied low temperature fuel cell system," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Special Session on fuel cell power,
- [235] D. Chrenko, M.-C. Péra, and D. Hissel, "Inversion-based control of a pem fuel cell system using energetic macroscopic representation," *ASME Journal of Fuel Cell Science and Technology*, vol. 6, no. 2, p. 024501 (5 pages),
- [236] D. Chrenko, A. Ravey, A. Djerdir, and A. Miraoui, "Adaptive control of hybrid vehicle depending on driving cycle analysis," in IECON. Vienna, Austria : IEEE, November 2013,
- [237] D. Chrenko, "Modeling and control of fuel cell systems by energetic macroscopic representation," in *ASME Conference for Fuel Cell Science and Technology*, Brooklyn, New-York, USA, June 2007, p. 155,
- [238] D. Chrenko, M.-C. Péra, D. Hissel, and M. Geweke, "Macroscopic modeling of a pefc system based on equivalent circuits of fuel and oxidant supply," *ASME Journal of Fuel Cell Science and Technology*, vol. 5, pp. 011 015–1 – 011 015–5,
- [239] D. Chrenko, D. Bouquain, and A. Miraoui, "Fuel cell electric scooter : Comparison between a hydrogen direct and a methanol hybrid architecture," in IECON. Porto, Portugal : IEEE, November 2009,
- [240] D. Chrenko, M. Kabalo, F. Gao, B. Blunier, D. Bouquain, and A. Miraoui, "Fuel cell electric scooter : Considerations toward an optimized architecture," in *Vehicular Power and Propulsion Conference (VPPC)*,
- [241] F. Gao, B. Blunier, D. Bouquain, and A. Miraoui, "Model based DC power source emulator for electrical and hybrid electrical vehicles drive train tests," *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1–6,
- [242] D. Chrenko, I. Diez Garcia, D. Bouquain, L. L. E. Moyne, and A. Miraoui, "An Energy and Power Based Approach Toward Design of Power Split for Urban Hybrid Vehicle," vol. 1, pp. 3–8,

- [243] D. Chrenko, L. Le Moynes, E.-H. Aglizim, D. Bouquain, and A. Miraoui, "High temperature pem fuel cell system for small mobile applications," in X Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrogeno : "Energias Renovables". Sociedad Mexicana del Hidrogeno, October 2010,

TABLE DES FIGURES

1.1	Consommation d'énergie, selon vecteur d'énergie [4]	1
1.2	Émissions de CO ₂ en 2014 en Mtons (World Carbon Project [8])	2
1.3	Évolution de la concentration de CO ₂ [8]	3
1.4	Évolution de la température [6]	4
1.5	Émissions de gaz à effet de serre par secteur en Europe [9]	4
1.6	Emissions de gaz à effet de serre par secteur [10]	5
1.7	Vue globale des degrés d'hybridation	7
1.8	Architectures hybrides [22]	9
1.9	Positionnement des co-encadrements dans les doctorats terminés.	14
1.10	Positionnement des co-encadrements dans les doctorats en cours.	14
1.11	Positionnement des co-encadrements dans les mémoires de master.	15
1.12	Positionnement des co-encadrement des projets de fin d'études.	15
2.1	Cycle de conduite européenne NEDC [23]	18
2.2	Cycle de conduite FTP 75 partie en villé, proposé par l'US EPA [24]	19
2.3	Cycle de conduite JC08 [25]	20
2.4	Cycles Artemis	21
2.5	Cycle de WLTC Cycle 3 [29]	22
2.6	Principe de fonctionnement du générateur de cycles de conduite	26
2.7	Comparaison entre cycle de conduite réel et artificiel	27
2.8	Cycles artificiels pour une distance de 300 km	28
2.9	Un segment du cycle de conduite	30
2.10	Comparaison de cycle de conduite réel et construit	31
2.11	Comparaison entre cycle réel et cycle simplifié	33
2.12	Influence des architectures et caractéristiques d'éco-conduite sur la consommation et le temps de trajet	34
2.13	Boitier d'enregistrement	35
3.1	Points de fonctionnement du MCI pour cycle EUDC. Véhicule MCI (ma- genta), véhicule hybride série (vert). [thèse ASUS]	38

3.2	Rendement d'un moteur électrique [thèse ASUS]	39
3.3	Étude bibliographique sur les méthodes de gestion d'énergie	47
4.1	Architecture de l'hybride série.	50
4.2	Voiture de course NOAO.	51
4.3	Modélisation de la voiture NOAO utilisant la méthode de modélisation quasi-statique.	52
4.4	Représentation énergétique macroscopique du système de voiture et de son système de contrôle à la source électrique équivalent.	56
4.5	Représentation énergétique macroscopique du système de voiture et de son système de contrôle.	57
4.6	Cycle de conduite et profils de puissances et du couple de la machine électrique.	58
4.7	Comparaison des courants, tensions et SOC de la batterie.	59
4.8	Comparaison des vitesses de rotation et de la consommation de carburant du moteur thermique avec générateur.	60
4.9	Points de fonctionnement du moteur-générateur.	62
4.10	Répartition de consommation en utilisant une gestion d'énergie initiale.	62
4.11	Répartition de consommation en utilisant une gestion d'énergie améliorée.	63
4.12	Résultats de comparaison entre gestion actuelle et optimisation DP.	69
4.13	Cycle de conduite agressive et son profil de puissances.	69
4.14	Résultats de l'optimisation DP pour augmenter l'autonomie.	70
4.15	Puissance moteur-générateur en fonction de la puissance de traction (croix magenta = commande initiale, cercles bleus = DP, points verts = DP pour autonomie augmentée).	70
4.16	Résultats de l'optimisation DP pour un cycle de conduite plus agressif.	71
4.17	Diminution maximale en utilisant un cycle de conduite plus agressif.	71
4.18	Potentielle de l'optimisation DP en fonction de nombre de tours et étude en fonction du rendement du système et consommation de carburant.	72
4.19	Interface graphique pour modélisation multi-architecture/multi-application	74
5.1	Couple maximal des moteurs à essence	77
5.2	Ligne des couples maximaux pour différents moteurs	82
5.3	Échanges de chaleur de l'extérieur vers l'habitacle	86
5.4	Température dans l'habitacle sans régulation (Température=30 °C, flux solaire de 880 W · m ⁻²)	86
5.5	Influence de la pression sur la consommation (Température=17 °C, flux solaire de 880 W · m ⁻²)	87

5.6	Influence du conducteur sur la consommation (Température=23 °C, flux solaire de $880 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, pression 1 bar)	87
5.7	Variation du besoin d'énergie sur l'année en fonction des données météorologiques	89
5.8	Machine à courant continu à excitation séparée	91
5.9	Représentation du flux, tension et couple en fonction de la vitesse pour une MSAP	92
5.10	Cartographie de rendements pour une MSAP sans convertisseur	93
5.11	Structure d'un élément électrochimique (en décharge) [These Schlasza]	95
5.12	Dispositif expérimental d'essai de cellules Kokam SLPB 100216216H	99
5.13	Température sur la surface d'une cellule de batterie	99
5.14	Température la plus chaude et la plus froide sur une cellule de batterie à différents taux de recharge	100
5.15	Température la plus chaude et la plus froide sur une cellule de batterie à différentes vitesses d'air	100
5.16	Température à une décharge excessive de la batterie avec un SOC inférieur à 20%	101
5.17	Variation de la résistance interne en fonction de la température	101
5.18	Température de la surface de batterie et champ d'écoulement de l'air pour (a) la première cellule et (b) la seconde cellule.	104
5.19	La vitesse d'écoulement de l'air dans le plan b (près de la surface 1R) pour faible, moyenne, et grande vitesse.	105
5.20	Relation entre les deux définitions de SOH	107
5.21	Mécanismes principaux de vieillissement d'une cellule de batterie Lithium-ion (extrait de [169, 170])	108
5.22	Cell structure including exterior cell components	111
5.23	Résultats de le FMEA pour une batterie Lithium-ion [154]	112
5.24	Modélisation et amélioration des paramètres	115
6.1	Différentes zones du modèle	118
6.2	Moteur Stirling	122
6.3	Diagramme PV de l'influence de la vitesse sur la pression de gaz - air [dessus] et hélium [dessous] ($T_{wh}=700 \text{ °C}$, $P_{mot}=7 \text{ bar}$, tube 1)	123
6.4	Puissance effective pour différentes vitesses ($T_{wh}=700 \text{ °C}$, tube 1)	123
6.5	Diagramme PV de l'influence de la température côté chaud - air [dessus] et hélium [dessous] ($N=600 \text{ rpm}$, $P_{mot}=7 \text{ bar}$, tube 1)	124
6.6	Puissance effective en fonction de la température côté chaud pour différentes vitesses ($P_{mot}=7 \text{ bar}$, tube 1)	124

6.7	Influence de la pression de remplissage sur la pression de gaz instantanée - air [dessus] et hélium [dessous] (N=600 rpm, T _{wh} =700 °C, tube 1)	125
6.8	Puissance effective en fonction de la pression pour différentes vitesses (T _{wh} =700 °C, tube 1)	125
6.9	Optimisation avec air, 10 bar, 700 °C	129
6.10	Optimisation avec hélium, 10 bar, 700 °C	130

LISTE DES TABLES

2.1	Paramètres d'initialisation pour générateur de cycles de conduite	23
2.2	Caractéristiques de différents types de route [26]	24
2.3	Types de Cycle [26]	24
2.4	Séquences du cycle de conduite	32
3.1	Classification des stratégies de gestion innovante	47
4.1	Paramètres de NOAO	52
4.2	Éléments de base du REM	54
4.3	Améliorations d'autonomie grâce à la DP	65
4.4	Améliorations des performances grâce à la DP	66
5.1	Validation du modèle en L/100km	80
5.2	Validation du modèle en L/100km	89
5.3	Paramètres de la MSAP	90
5.4	Mécanismes de vieillissement dans des cellules de batterie Lithium-ion selon composants	109
5.5	Sensibilité des paramètres du modèle de Gao [192]	114



ANNEXES

CURRICULUM VITAE DÉTAILLÉ

A.1/ RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX

- **Nom** : : CHRENKO
- **Prénom** : : Daniela
- **Âge** : : 39 ans
- **Date de Naissance** : : 13 juin 1978 à Munich, Allemagne
- **Situation Familiale** : : célibataire, 1 enfant
- **Adresse** : : 21 rue Champion
90000 Belfort
- **Téléphone** : : 06 34 98 52 47
- **Courriel** : : d.chrenko@gmail.com

A.2/ SITUATION ACTUELLE

DEPUIS SEPTEMBRE 2016

Maître de conférences sur le poste n°4035 à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM). Ce poste est inscrit dans la section C.N.U. 63 (Génie, électrique, électronique, photonique et systèmes) .

Les activités de ce poste s'inscrivent dans le département Energie dirigé par Dr. Abdesslem DJERDIR ainsi que dans de département Énergie de l'Institut FEMTO-ST, CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comte, dirigée par Dr. François LANZETTA. Mes activités d'enseignement et recherche sont détaillées dans le paragraphe A.4.

SEPTEMBRE 2009 - AOÛT 2016

Maître de conférences sur le poste n°0730 à l'Institut Supérieur d'Automobile et Transport (ISAT) de l'Université de Bourgogne. Ce poste est inscrit dans la section C.N.U. 62 (Énergétique, génie des procédés).

Les activités de ce poste s'inscrivent dans le département EPEE (Énergétique Propulsion Électronique et Environnement) dirigé par Dr. El-Hassane AGLZIM ainsi que dans le laboratoire DRIVE ID-MOTION (EA 1859), au sein de l'équipe EPEE dirigée par Pr. Sidi-Mohammed SENOUCI. Mes activités d'enseignement et recherche sont détaillées dans

le paragraphe A.4.

A.3/ ENSEIGNEMENT

La transmission de savoir est une vraie passion pour moi, particulièrement quand elle permet de transmettre du savoir dans des domaines de la technologie qui sont en constante évolution et qui pourront influencer nos vies futures de façon positive. C'est pour cela que j'ai toujours accepté les tâches d'enseignement avec plaisir et me suis toujours investie pour développer des cours intéressants et variés, qui répondent bien aux besoins des étudiants.

J'ai donc eu la possibilité de monter entre autres les modules suivants au sein de l'ISAT

- **Machines Électriques** : ISAT 3A, département EE, 9h CM, 12h TD, 15h TP, français
 - Introduction des machines électriques en vue d'une utilisation dans l'automobile.
 - Machine à Courant Continu, Machine Synchrone (avec et sans aimants permanents), Machine Asynchrone, Autres machines (Switch Reluctance, Pas-à-pas)
 - Approche technique, mais également dimensionnement et calculs, gestion et surtout avantages et inconvénients d'application.
- **Électronique de Puissance** : ISAT 3A, département EE, 9h CM, 12h TD, 15h TP, français
 - Introduction des machines, composants et architectures d'électronique de puissance en vue d'une utilisation dans l'automobile.
 - Semi-conducteurs, Hacheurs, Onduleurs, Redresseurs
 - Approche technique, mais également dimensionnement et calculs, gestion et surtout avantages et inconvénients d'application.
- **Machines Électriques et Électronique de Puissance** : ISAT 3A, département EE, 12h CM, 12h TD, 15h TP, français
 - Les cours précédents ont été réunis dans un seul module en 2015/16
 - Il reprend les sujets des modules introduits ci-dessus
 - Ce module peut être complété par des TPs supplémentaires (15h TP, pas ouvert en 2015/16).
- **Transmission Électrique et Motorisation Hybride** : ISAT 4A, département EE, 9h CM, 12h TD, 10-15h TP, français-anglais
 - Introduction des architectures de véhicules électriques et hybrides, réalisation de chaînes de traction à l'aide des machines électriques, composants et architectures d'électronique de puissance en vue d'une utilisation dans l'automobile.
 - Approche historique, véhicule électrique, véhicule hybride série, parallèle, série-parallèle et complexe, adaptation d'autres composants d'automobile (frein, climatisation), gestion d'énergie.
 - Le même module est également enseigné en anglais au sein du master AESM.
- **Récupération et Stockage d'Énergie** : ISAT 5A, département EE, 9h CM, 12h TD, 15h TP, anglais
 - Introduction des composants de stockage d'énergie et notions de production d'énergie renouvelable.
 - Systèmes de Batterie (Lithium-ion, NiMH, plomb), super condensateurs, pile à com-

- bustible et volant d'inertie.
- Introduction de technologies en vue de l'optimisation du rendement, de l'énergie et de la puissance spécifique. Dimensionnement, avantages et inconvénients pour l'application dans un véhicule.
- Le même module est également enseigné en anglais au sein du master AESM.

De plus je suis en train de prendre en main le module Prototypage Rapide à l'UTBM qui vise la mise en place d'acquisitions de données et la gestion de systèmes à travers des applications autonomes programmables. Je vais prendre la responsabilité de ce module à partir d'automne 2017.

Le service d'enseignement est complété par des interventions dans différents modules pour des travaux dirigés et ou des travaux pratiques.

Ces activités d'enseignement ont été reconnues et ont facilité des échanges Erasmus Enseignement :

Octobre 2010 : Hochschule Zwickau, Allemagne, 8h d'enseignement

Octobre 2011 : Hochschule für Angewandte Wissenschaften Karlsruhe, Allemagne, 8h d'enseignement

Avril 2012 : Technologico de Monterray, Toluca, Mexique, 12h d'enseignement

Avril 2013 : Hochschule für Angewandte Wissenschaften Karlsruhe, Allemagne, 8h d'enseignement

Juin 2013 : Université Windsor et Concordia University Montréal, Canada, 8h d'enseignement

Février 2014 : Université Al-Ain, Abu Dhabi, 6h d'enseignement

October 2016 : Technologico de Monterray, Toluca, Mexique, 12h d'enseignement

Les activités d'enseignement ne se limitent pas uniquement aux heures d'enseignement, mais également à l'encadrement de plusieurs projets d'étudiants et de stagiaires. Ces projets permettent d'approfondir des aspects d'apprentissage et de découvrir le monde du travail et/ou de recherche pour les étudiants.

Une liste complète des enseignements et projets se trouve dans la section A.10.

A.4/ RECHERCHE

Les activités de recherche qui m'ont permis de présenter mon rapport de HDR s'inscrivent en grand majorité dans les activités du laboratoire ISAT DRIVE EA 1859 présenté ci-dessous en détail dans la suite. Le laboratoire ISAT Drive- ID Motion (EA 1859), fondé en 2009, est dirigé par Pr. Stephane FONTAINE et se compose de 23 membres permanents et environ 20 doctorants et couvre 4 thématiques de recherche :

- Mécanique et Vibro-acoustique
 - matériaux composites et poreux
 - vibro-acoustique
- Energie Propulsion et Électronique Embarquée
 - véhicule intelligent et communicant
 - propulsion (je fais partie de cette thématique)

La taille et l'âge du laboratoire implique que toutes les thématiques soient toujours en développement. Il existe la possibilité d'échanger étroitement avec des collègues de différentes spécialisations. Cette approche permet d'approfondir ses connaissances dans son domaine de spécialisation tout en travaillant également sur des thématiques qui ne se basent pas sur sa spécialité.

Mes activités de recherche s'inscrivent dans une logique continue depuis mes débuts dans recherche en 2005. J'ai commencé mes travaux dans le cadre d'un stage de master sur l'analyse d'une pile à combustible à membrane échangeuse de proton [238]. Ce travail s'est poursuivi par des activités de modélisation multi-physique d'une pile à combustible à membrane échangeuse de proton avec reformeur de diesel, et fut le sujet de ma thèse de doctorat (paragraphe A.7), [94, 234, 235, 237].

Ces travaux m'ont donné la possibilité d'en apprendre plus sur les véhicules à pile à combustible, ainsi que sur d'autres architectures de véhicules électriques et hybrides. Cette dernière thématique a pu être approfondie durant mon poste d'ATER, que j'ai effectué dans le département GESC de l'Université de Technologie Belfort-Montbéliard. Ces travaux m'ont permis d'améliorer mon expertise en vue d'une intégration d'un système de pile à combustible dans divers véhicules, [114, 240]. Une partie de ce travail a même été honoré par le best paper award, de la conférence IEEE IECON en 2009, [239].

Ma collaboration avec le département GESC s'est montrée tellement fructueuse qu'elle a pu se poursuivre après 2009. Cette coopération continue se manifeste également dans le fait que j'ai obtenu le statut de chercheuse associée au sein du laboratoire IRTESSET de 2009 à 2016. Ce statut a donné lieu à des coopérations dans le domaine de la modélisation multi-physique des systèmes pile à combustible, [241, 233]. Un projet région Franche-Comté sur le vieillissement des piles à combustible, ainsi que le co-encadrement de deux thèses de doctorat : Diagnostic des batteries pour véhicules électriques et hybrides [thèse Schlasza, paragraphe 7.3.1.1] [154] qui a été soutenue fin 2016 et une thèse sur les changements des gestions à l'intérieur des véhicules en vue d'une conduite autonome [thèse Schäfer, section 7.3.1.2] qui a débuté en 2015.

Lors de mon arrivée en 2009 à l'ISAT, la thématique des véhicules électriques et hybrides venait juste d'être entreprise. Un changement de maquette pédagogique s'est focalisé sur cette thématique, mais étant la seule personne avec des connaissances dans le domaine, une partie considérable de mon activité a dû être investie dans le montage des nouveaux modules.

Le début de mes activités de recherche a été facilité par le FABER (Faciliter l'Arrivée en Bourgogne des Enseignants Chercheurs) ; ce financement m'a permis d'acquérir un système de pile à combustible en 2012.

Étant donné que nous ne disposions initialement pas encore de l'équipement expérimental, la plupart des efforts ont porté sur la modélisation des systèmes avec pile à combustible, [114, 239, 240]. L'arrivée d'El-Hassane Aglzim (MdC) en 2010, expert en spectrométrie d'impédance, a permis de consolider l'équipe et renforcer les activités dans ce domaine, [128, 242, 243].

Dans le même temps il s'est avéré que le dimensionnement et l'utilisation des composants dans les véhicules hybrides sont fortement liés à la commande, introduisant le besoin de pouvoir utiliser différentes approches pour étudier leurs effets. Ces travaux ont été renforcés par l'arrivée des étudiants Zul Hilmi Che Daud et Zainab Asus qui avaient comme objectif de travailler sur les systèmes hybrides. Ces deux étudiants ont poursuivi leurs études par des doctorats à partir de 2011 [thèse Che Daud, paragraphe 7.1.1.3] et [thèse Asus, paragraphe 7.1.1.2]. Avec ces doctorats, il fut possible d'ouvrir deux axes de

recherche. L'un de ces axes s'est concentré sur la gestion d'énergie dans les véhicules hybrides.

Un travail sur le comportement électro-thermique d'un empilement de cellules de batterie de type Lithium-ion a pu être effectué par Zul Hilmi Che Daud. Son travail a porté sur la modélisation fluide améliorée par des aspects de perte de chaleur due à la résistance interne des batteries ainsi qu'une validation expérimentale sur un empilement de 3 cellules à l'aide de capteurs de température et de la PIV (Particle Image Velocimetry) [32, 152, 229]. La thématique du diagnostic des défauts à l'intérieur des cellules de batterie est également étudiée au travers d'une thèse industrielle en coopération avec le laboratoire IRTES-SET, le laboratoire IEEM de la Hochschule Karlsruhe et l'entreprise Bosch [thèse Schlasza, paragraphe 7.3.1.1] [154].

Dans le même temps, Zaniab Asus a réalisé un travail intéressant sur la commande des véhicules hybrides série de compétition, [2, 18, 3, 20, 32]. Même si les méthodes adaptées ont pu clairement être identifiées pendant cette thèse il s'est avéré que la différence de commande selon la taille et la configuration du véhicule hybride ainsi que l'application de la commande dans un contexte réel sont deux verrous technologiques qui doivent être levés. Il fut possible d'étudier cette thématique au travers d'une thèse de doctorat en coopération avec SODEMO MOTORS [thèse Gan, paragraphe 7.1.1.5].

Néanmoins, un aspect de la thématique a particulièrement retenu mon intérêt : comme le grand désavantage des véhicules électriques est l'autonomie limitée, il est important de pouvoir prévoir l'autonomie restante avec une grande fiabilité. Pour cela il faut connaître les besoins énergétiques qui sont fixés par les cycles de conduite. De plus, il est maintenant reconnu que les cycles de conduite utilisés pour l'homologation comme le NEDC ne sont pas réalistes. Il est donc important de pouvoir générer des cycles artificiels de conduite qui représentent correctement toutes les typologies pouvant être rencontrées sur un véhicule et qui respectent également la distribution statistique des différents types de cycle. La coopération avec Irene Garcia [Master DIEZ, paragraphe 7.1.2.1] a permis de développer un générateur de cycles de conduite représentatif, [31, 231]. Ce générateur a par exemple été utilisé pour dimensionner les composants d'un véhicule hybride série pour optimiser sa consommation sur sa durée de vie complète (en coopération avec Shiyu Gan (Master)), [32].

Un autre point important réside dans le fait que la gestion optimale de l'énergie au sein des véhicules hybrides requièrent la connaissance du cycle de conduite complet à priori [47]. Ceci n'est pas accessible. Une solution est l'utilisation du cycle espéré au travers des données fournies par un logiciel de navigation routière [37]. Mais étant donné que ce logiciel de navigation n'est pas forcément utilisé pour les trajets quotidiens une thèse a été lancée en coopération avec Danielson Engineering pour faire la prédiction statistique du cycle de conduite [thèse JOUD, paragraphe 7.1.1.4].

Une fois le cycle de conduite connu, il est possible de prévoir la demande d'énergie nécessaire pour la propulsion [1]. Mais pour prévoir exactement la consommation d'un véhicule il faut également prendre en compte les consommations auxiliaires qui sont fortement influencées par les conditions environnementales. Ce travail a fait l'objet de deux stages de fin d'étude [Stage VALET, paragraphe 7.1.3.1 et stage DAMAS, paragraphe 7.1.3.2].

Les activités de recherche du laboratoire étant diverses j'ai également coencadré une thèse de doctorat CIFRE dans la domaine de la valorisation des rejets thermiques qui a permis la modélisation, la validation expérimentale et l'optimisation d'un moteur Stirling,

[223, 222, 226] [thèse BERT, paragraphe 7.1.1.1].

En septembre 2016 j'ai rejoint la laboratoire Femto-ST/Energie où mes activités de recherche avec une spécialisation dans la thématique du vieillissement des batteries sont juste en train de démarrer.

Une liste complète de mes publications se trouve dans le chapitre Bibliography.

A.4.1/ ENCADREMENT

Nom	Prénom	Niv.	Date	Directeur	Autres Encadrants	Sujet	Ref
Thèses de Doctorat							
Bert	Juliette	PhD	2009-12	L. Le Moyne	D. Chrenko T. So- phy	valorisation des rejets thermiques, moteur stirling	[222, 226]
Asus	Zainab	MSc. PhD	2010-14	L. Le Moyne	D. Chrenko EH. Aglizim	stratégie de commande véhicule hybride série de compétition	[18, 2, 32, 20, 3]
Che Daud	Zul Hilmi	MSc. PhD	2010-14	L. Le Moyne	D. Chrenko EH. Aglizim	Modélisation électrique et ther- mique des batterie lithium ion pour véhicule	[152, 229, 32]
Schlasza	Christian	PhD	2013-16	A. Miraoui	D. Bouquain R. Kriesten D. Chrenko	diagnostique cellules Lilon	[154]
Mémoire de Master							
Garcia	Irene	MSc Eng. MSc.	2010-12 2013	L. Le Moyne	D. Chrenko	générateur de cycle de conduite	[31, 231]
Gan	Shiyu	PhD	2015 -	L. Le Moyne	A. Keromnes D. Chrenko	Dimensioning of components of hy- brid vehicles with regard to life time Prédiction de Consommation	[32]
Bachelor of Engineering							
Binti muddin Damas	Siti Asfa- rina Carlos	BEng BEng	2013 2016		EH. Aglizim D. Chrenko A. Keromnes D. Chrenko	Low Temperature fuel cell systems Influences paramètres environne- mentaux sur consommation	
Stage							
Bouchnaffa	Reda	Eng.	2012-13		D. Chrenko	évaluation des besoins énergétiques des différents véhicules sur un circuit de course automobile	
Gan	Shiyu	PhD	2014 -	L. Le Moyne	D. Chrenko	Commande pour des systèmes hy- brides multi architecture	[47]
Valet	Baptiste	Stage	2015		A. Keromnes D. Chrenko	Influences paramètres environne- mentaux sur consommation	

A.5/ RÉPONSES AUX APPELS À PROJETS ET PROJETS COLLABORATIFS

Les projets de recherche menés dans le cadre d'appels à projet régionaux, nationaux et internationaux deviennent de plus en plus importants car ils permettent à la fois la coopération avec différents laboratoires de recherche en France et à l'étranger mais également la coopération avec des partenaires industriels.

Ma première expérience de montage de projet date du projet Celina - Fuel Cell Integration in a New Configured Aircraft dans le cadre du FP6, dans lequel j'ai pu participer activement au montage du projet.

Après, j'ai eu la possibilité de faire mon doctorat dans le cadre du projet national français GAPPAC, où j'ai pu participer à des réunions d'avancement et à la rédaction de divers rapports.

Pour le projet Noao, j'ai représenté l'ISAT. Ce projet financé notamment par le département de la Nièvre a permis la construction d'un véhicule électrique de compétition avec prolongateur d'autonomie. J'ai participé activement à toutes les étapes de conception, construction et essai de l'autonomie. La Noao est devenue le véhicule de référence pour de multiples projets de recherche.

Dans la suite de ma carrière, j'aimerais bien participer plus activement au montage et à la gestion de projets régionaux, nationaux et internationaux. Cette expérience serait très enrichissante pour moi, car cela me permettrait de fusionner mes intérêts de recherche avec la gestion de projet et la coopération avec des personnes de différentes formations.

A.6/ AUTRES ACTIVITÉS

J'ai souvent eu la possibilité de participer à des projets intéressants et enrichissants qui sortent du travail quotidien de maître de conférences. Je suis par exemple professeur invitée à l'université centrale de l'Équateur. Ce qui me permet de capitaliser des expériences dans un cercle culturel différent et me montre un autre point de vue sur la technologie.

Par ailleurs, j'ai pu coorganiser les JMEB 2010 - Journées de Mobilité Electrique en Bourgogne, conférence publique qui permet la promotion des véhicules électriques au près des utilisateurs professionnels et du grand public.

Étant d'origine Allemande, j'ai une certaine facilité pour lier des contacts avec les universités et entreprises en Allemagne. J'ai profité de cet avantage pour solidifier la coopération entre l'ISAT et la Hochschule Zwickau et également la Hochschule Karlsruhe (HsKA).

Dans le cadre de la coopération avec l'UTBM, j'ai pu participer à la HAW Summer School tous les ans depuis 2012. C'est une école d'été qui permet à une trentaine d'étudiants de différents pays d'étudier l'ingénierie d'automobile dans différentes universités en Allemagne.

Cette coopération a permis un contact avantageux entre l'UTBM et la Hochschule Karlsruhe qui a mené au coencadrement de deux thèses de doctorat [thèse Schlasza, paragraphe 7.3.1.1, [154] et thèse Schäfer, paragraphe 7.3.1.2].

Mes activités de recherche m'ont permis d'obtenir le statut senior member IEEE fin 2014 pour mes nombreuses travaux dans le domaine de l'électrotechnique depuis 5 ans.

De plus j'ai pu co-organiser deux sessions spéciales pour la conférence FDFC 2013 (Fundamentals and Developpements in Fuel Cells, Karlsruhe, Germany, April 2013) sur le transport terrestre et IEEE ECON 2015, Seoul, Corée sur l'application des convertisseurs pour des systèmes pile à combustible. Malheureusement, les deux sessions spéciales n'étaient pas retenues pour les conférences, mais j'ai pu néanmoins agir comme chairman pour une partie de la conférence FDFC 2013.

D'autre part j'ai participé aux comités d'organisation de la conférence FDFC 2013 ainsi que pour la conférence IEEE International Transportation Electrification Conference (ITEC) en 2014, 2015 et 2016.

Mes activités de recherche ont été valorisées dans des publications régulières et ma reconnaissance fait que j'ai effectué des relectures de multiples articles pour des journaux reconnus comme Elsevier Energy, International Journal of Hydrogen Energy or IEEE Transactions of Industrial Electronics.

A.7/ THÈSE DE DOCTORAT (04.2006 - 12.2008) - EN SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR

- **Titre de la Thèse** : *Modélisation par Représentation Énergétique Macroscopique et Commande d'un Système Pile à Combustible Basse Température alimenté en Hydrocarbure*
- **Encadrement** : Pr. Marie-Cécile PÉRA, Université de Franche-Comté (Section 63)
Pr. Daniel HISSEL, Université de Franche-Comté (Section 61)
- **Université** : Université de Franche-Comté
- **Laboratoire** : Femto-St, Enisys, Membre de l'Institut FCLAB
- **Début de Thèse** : avril 2006
- **Fin de Thèse** : 25 novembre 2008
- **Mention** : très honorable
- **Composition du Jury** :
- **Président** : Pr. Alain BOUSCAYROL, USTL-L2EP, Lille (Section 63)
- **Rapporteurs** : Pr. Yann BULTEL, LEPMI-ENSEEG, Grenoble (Section 62)
Pr. Maurice FADEL, CNRS - INPT, LEEI, Toulouse (Section 63)
- **Examineurs** : Pr. Sylvain ALLANO, SATIE, Cachan (Section 63)
Pr. Stephan KABELAC, HSU, Hambourg, Allemagne (Thermodynamicien)
Dr. Ludmilla GAUTHIER, Eifer, Karlsruhe, Allemagne (docteur des sciences des matériaux)
- **Mots clefs** : Pile à Combustible, PEFC, HTPMFC, Générateur d'Hydrogène, Reformeur, Diesel, Commande, Représentation Énergétique Macroscopique

CONTEXTE

Les systèmes pile à combustible (SPAC) sont prometteurs pour la production d'énergie électrique. Les applications potentielles concernent les secteurs portable, stationnaire ou de transport. La pile à combustible (PAC) est alimentée en hydrogène ; l'hydrogène peut être produit à partir d'un procédé d'électrolyse en utilisant des énergies renouvelables ou à partir d'hydrocarbures transformés en un gaz riche en hydrogène. Un SPAC contient, parmi d'autres éléments, deux composants clés : l'unité de production de combustible et l'empilement de cellules (stack). L'utilisation d'un SPAC alimenté en hydrocarbure comme unité de puissance auxiliaire dans le transport peut être un point de départ intéressant pour cette technologie dans la mesure où elle utilise l'infrastructure de distribution

existante.

Les SPAC alimentés en hydrocarbure sont des systèmes complexes, multi physiques qui combinent différents domaines énergétiques c'est à dire électro-chimique, électrique, pneumatique et thermique. Un tel système fonctionne seulement dans des conditions opérationnelles bien définies. La mise en oeuvre d'un SPAC demande donc un système de contrôle bien adapté. L'approche classique du développement d'une commande suppose souvent de définir la fonction de transfert du système complet ce qui est difficile, voire impossible, compte tenu de la complexité du système considéré. En conséquence, la structure de commande des systèmes complexes multi-domaines se base souvent sur des observations empiriques ou sur l'expertise. Il s'agit ici de trouver une approche systématique qui permette de déduire la structure de la commande à partir de la description du système. Une telle approche vise à simplifier le développement de la structure de commande pour des systèmes complexes multi domaines et à assurer que la structure de la commande est adaptée aux besoins du système.

Dans ce travail, un modèle complet d'un SPAC basse température alimenté en diesel commercial est présenté. Il est adapté au développement de la structure de commande. Le SPAC étudié est destiné à fournir d'une part une puissance électrique de 25 kW, d'autre part de la chaleur valorisée sous cette forme ou utilisée pour la climatisation.

Différentes méthodologies de modélisation sont présentées. Leur degré de pertinence est évalué pour modéliser des systèmes complexes multi domaines et pour être utilisé pour le développement de la structure de la commande. La Représentation Énergétique Macroscopique (REM) est identifiée comme la méthodologie la mieux adaptée.

Un modèle de dispositif de transformation du combustible est présenté et implanté dans Matlab/Simulink™. Pour obtenir un mélange riche en hydrogène, l'hydrocarbure doit être fractionné. Par la suite, le mélange de gaz doit être purifié afin d'éviter la contamination de la pile à combustible par des dérivés soufrés et/ou par du monoxyde de carbone. Également, un modèle de stack est présenté. Il prend en compte les débits gazeux dans les différentes couches, l'humidification de la membrane et la tension de pile.

Pour confirmer que le modèle peut être utilisé pour le développement de la structure de commande, celle concernant la température et les débits de gaz pour le SPAC est développée. La structure de commande peut être obtenue par une inversion bloc par bloc du modèle. L'approche donne une structure de commande mais le choix des régulateurs et leur paramétrage est du ressort du développeur. L'application de la commande montre qu'en utilisant la REM, il est possible de dériver la structure de la commande à partir du modèle d'un système complexe multi domaine, sans avoir besoin de la fonction de transfert du système entier.

La thèse est rédigée en anglais (voir <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00358312/fr/>), une synthèse de la thèse en français est disponible.

A.8/ CONNAISSANCES ANTÉRIEURES

A.8.1/ FORMATIONS

AVRIL 2006 - DÉCEMBRE 2008

- Doctorat à l'Université de Franche-Comté (STGI) à Belfort, France
- Lieu : Laboratoire Femto-St, Département Énergie et ingénierie des systèmes multi-physiques (Enisys), membre du Institut FCLAB
- Thématique : Modélisation pour le développement de la commande des systèmes complexes, multi-domaines
- Thèse soutenue le 25 novembre 2008
- Mention : très honorable

OCTOBRE 2003 - MARS 2006

- Master of Science en Ingénierie des Procédés à l'Université des Sciences Appliquées, Hambourg, Allemagne
- Master Thesis (mai 2005 - octobre 2005) au L2ES, Belfort, France encadré par Marie-Cécile Péra
- **Characterization of a Polymer Electrolyte Fuel Cell System, Contribution to the Study of Fuel Cell Ageing**
- Mention : très bien

OCTOBRE 1998 - SEPTEMBRE 2004

- Diplôme d'ingénieur en Sciences Appliquées à l'Université des Sciences Appliquées, Wedel, Allemagne
- Mention : bien

A.8.2/ EXPÉRIENCES PROFESSIONNELLES

INGÉNIEUR SYSTÈME AIRBUS, HAMBOURG, ALLEMAGNE

<i>Durée</i>	- novembre 2002 - mars 2006
<i>Fonction</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Responsable de la Stratégie et de la communication pour le développement de nouveaux systèmes de génération électrique - Orientation stratégique et industrialisation, planification de la promotion des projets nationaux et régionaux, relations publiques (par exemple, participation à l'organisation de l'exposition sur l'hydrogène H2 Expo 2006 à Hambourg, Activités régionales) - Veille technologique pour évaluer le potentiel des piles à combustible (composants, systèmes intégrés, performances) dans le domaine de l'aéronautique - Recherche sur différents thèmes afin de trouver une alternative aux systèmes aéronautiques de génération électrique actuels - Travail opérationnel de planification de projets concernant les piles à combustible au sein d'Airbus
<i>Responsabilités</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Octobre 2004 – Avril 2005 : Encadrement d'un projet transnational au sein du programme ECATA - 2004 – 2006 : Membre du transnational Think Tank - 2003 – 2004 : Adjointe du responsable du service Engineering Power Plant - Technology Application - Novembre 2002 – Mars 2006 : Mise en place de projets nationaux et européens (Strep / FP6)

A.8.3/ COMPÉTENCES TECHNIQUES

- **Orientation thématique :**
 - Début des études dans le génie de physique appliquée dans le but d'avoir une vue d'ensemble sur l'ingénierie, de pouvoir s'adapter aux différentes applications notamment dans les domaines qui n'ont pas d'ingénieurs spécifiques. Début des travaux dans le domaine des piles à combustible.
 - Poursuite des études dans le génie des procédés due à la non existence de formation de master en génie de physique appliquée. Le génie des procédés concentre l'étude des procédés nécessaires pour transformer un matériau brut en produit et a une approche pluridisciplinaire. Poursuite des travaux dans le domaine des piles à combustible, avec un stage et une thèse de master effectués au L2ES, Belfort.
 - Poursuite des travaux de master avec un doctorat, au L2ES, aujourd'hui Femto-St, département Énergie, un laboratoire de génie électrique. Les travaux effectués pendant la thèse sont pluridisciplinaires.
- **Ingénierie :** construction mécanique, technologie chimique, thermique, électrotechnique, techniques de contrôle et régulation, simulation, systèmes aéronautiques, gestion de projet, planification stratégique
- **Bureautique :** Word, Excel, Power Point, Open Office
LaTeX, Gnuplot, Jabref (mis en forme des publications scientifiques)
- **Logiciels Scientifiques :** Matlab/Simulink, LabView, CarMaker
- **Programmation :** Pascal, C (connaissances fondamentales)

A.8.4/ INTERCULTURALITÉ

Je me sens comme citoyenne européenne. Avec des origines Allemandes et Néerlandaise, la diversité culturelle est pour moi toujours enrichissante, c'est pour cela que j'apprécie la vie en France et le travail dans la recherche qui facilite le contact avec des personnes de différents horizons. J'apprécie également la possibilité de pouvoir voyager et transmettre mon savoir ailleurs, comme j'ai eu l'occasion de le faire lors de mes multiples voyages comme professeur invité.

Je suis capable et intéressée par la possibilité d'enseigner dans les langues française, anglaise et allemande.

- **Allemand** : langue maternelle
- **Anglais Professionnel** : 02.2004 Toefl 273/300, Tous les cours pendant les études de master ont été dispensés en anglais, le rapport de thèse du doctorat a été rédigé en anglais. Enseignement de multiples modules en Anglais.
- **Français** : vie en France depuis avril 2006, niveau consolidé à l'oral et à l'écrit. Soutenance de thèse en français, synthèse de thèse et rapport de projet rédigés en français. Enseignement de multiples modules en Français.

A.9/ INTÉRÊTS

- **Musique** : Pratique de la flûte traversière (depuis 15 ans), fait partie d'une association de musique de chambre, et d'une chorale rock
- **Sport** : VTT, gymnastique, ski alpin, randonnée
- **Loisirs** : Lecture (en trois langues), bricolage (tricotage, crochet, décoration)

A.10/ TABLEAU DES ENSEIGNEMENTS

Les relevés officiels des enseignement effectués sont donnés :

	Matière	Lieu	Niv	Heures		
				CM	TD	TP
2016-2017	Energy Storage	ISAT	M2	12	12	0
	Advanced Physics	Pol.O.	M1	5	7	
	EL 47 Electrotechniques	UTBM	EE		28	
	SM 53 Prototypage Rapide	UTBM	EE			30
	ER 54 Renewable Energy	UTBM	EE		40	60
	ER 52 Thermique du Bâtiment	UTBM	EE	6	12	
	Perspectives on Energy and Environ.	UFC	M1	3	4	
2015-2016	Machines Électriques et Électron. de Puis.	ISAT	Ing. 3A	9	12	
	Projet EVOX	ISAT	Ing. 31			20
	Transmission Électrique et Motor. Hybride	ISAT	Ing.4A	12	12	30
	Récupération et Stockage d'Énergie	ISAT	M2 et 5A	9	12	15
	Energy Storage	ISAT	M2	12	12	15
	SM 58 Systèmes Hybrides	UTBM	EE		20	

	Perspectives on Energy and Environ.	UFC	M1	3	4	
2014-2015	Machines Électriques	ISAT	Ing. 3A	9	12	15
	Électronique de Puissances	ISAT	Ing.3A	9	12	15
	Projet EVOX	ISAT	Ing. 31			20
	Transmission Électrique et Motor. Hybride	ISAT	Ing.4A	12	12	30
	Récupération et Stockage d'Énergie	ISAT	Ing. 5A	9	12	15
	Advanced Physics	ISAT	M1	8	17	
	Energy Storage	ISAT	M2	12	12	15
	SM 58 Systèmes Hybrides	UTBM	EE		20	15
	Perspectives on Energy and Environ.	UFC	M1	3	4	
2013-2014	Machines Électriques	ISAT	Ing. 3A	9	12	15
	Électronique de Puissances	ISAT	Ing.3A	9	12	15
	Projet EVOX	ISAT	Ing. 31			20
	Transmission Électrique et Motor. Hybride	ISAT	Ing.4A	12	12	30
	Récupération et Stockage d'Énergie	ISAT	Ing. 5A	9	12	15
	Advanced Physics	ISAT	M1	8	17	
	Energy Storage	ISAT	M2	12	12	15
	ER 54 Renewable Energy	UTBM	EE		40	60
	Perspectives on Energy and Environ.	UFC	M1	3	4	
2012-2013	Machines Électriques	ISAT	Ing. 3A	9	12	15
	Électronique de Puissances	ISAT	Ing.3A	9	12	15
	Transmission Électrique et Motor. Hybride	ISAT	Ing.4A	12	12	30
	Récupération et Stockage d'Énergie	ISAT	Ing. 5A	9	12	15
	Advanced Physics	ISAT	M1	8	17	
	Energy Storage	ISAT	M2	12	12	15
	SM 58 Systèmes Hybrides	UTBM	EE			15
	ER 54 Renewable Energy	UTBM	EE		40	60
2011-2012	Machines Électriques	ISAT	Ing. 3A	9	12	30
	Électronique de Puissances	ISAT	Ing. 3A	9	12	30
	Transmission Électrique et Motori. Hybride	ISAT	Ing. 4A	12	24	45
	Récupération et Stockage d'Énergie	ISAT	Ing. 5A	9	12	
	Advanced Physics	ISAT	M1	10	20	
	Propulsion	ISAT	Ing. 3A		12	
	SM 59 Système de Stockage	UTBM	EE		20	30
2010-2011	Machines Électriques	ISAT	Ing. 3A	9	24	45
	Électronique de Puissances	ISAT	Ing. 3A	9	12	30
	Transmission Électrique et Motor. Hybride	ISAT	Ing. 4A	12	24	45
	Récupération et Stockage d'Énergie	ISAT	Ing. 5A	9	12	
	Propulsion	ISAT	Ing. 3A		12	
	TW 54 - Projet	UTBM	EE			10
2009-2010	Machines Électriques	ISAT	Ing. 3A	9	24	45
	Électronique de Puissances	ISAT	Ing. 3A	9	12	30
	Propulsion	ISAT	Ing. 3A		12	
	Électrotechnique	ISAT	Ing. 2A		24	
2008-2009	Sources d'énergie électrique	UTBM	Ing. 5A		40	24
	Ingénierie des systèmes	UTBM	Ing. 4A	2	2	
	Suivi des stages	UTBM	Ing. 5A			10
	Suivi d'un projet	UTBM	Ing. 4A			18

2007–2008	Électromagnétisme Anglais et Technologie Sources d'énergie électrique	UFC UFC UTBM	FAC 3A FAC 3A Ing. 5A	5	10 20	24
2006–2007	Anglais et Technologie	UFC	FAC 3A	5		12

Résumé :

Pour pouvoir continuer à utiliser les véhicules en vue des limitations, il est important qu'ils améliorent leur efficacité énergétique. Une piste prometteuse est de concevoir des véhicules hybrides qui combinent différentes sources et convertisseurs d'énergie. Pour cela, ils doivent être conçus et testés sur la totalité des cycles qu'ils rencontrent pendant leur durée de vie. La gestion d'énergie est cruciale, il y a les solutions déterministes, d'optimisation, et prédictive. L'étude de la gestion nécessite la disponibilité de modèles complets, multi-physiques et rapides. En dehors d'une optimisation globale, il est possible d'améliorer certaines composantes de façon individuelle, comme le moteur à combustion interne ou les batteries Lithium-ion, de prévoir leur remplacement avec des piles à combustibles ou encore de valoriser les rejets thermiques grâce à un moteur Stirling. Tous ces aspects doivent être intégrés dans des véhicules afin d'améliorer leur efficacité énergétique.

Mots-clés : Véhicule hybride, Cycle de conduite, Modélisation, Batterie Lithium-ion, Pile à Combustible, Moteur Stirling

Abstract:

In order to be able to continue the use of cars, they have to increase their energy efficiency. One promising approach is the use of hybrid vehicles, which combine different energy sources and converters. Therefore, they have to be designed and tested on all the cycles they will encounter during the vehicle life. Energy management is an important point; there are deterministic, optimization based and predictive energy management approaches. The study of energy management requires the availability of complete, multi-physical and fast models. Other than by global optimization, it is possible to improve certain components individually, like internal combustion engine or Lithium-ion batteries, to replace them by a fuel cell or to recover thermal energy using a Stirling engine. All those aspects have to be integrated into vehicles in order to improve the energy efficiency.

Keywords: Hybrid vehicle, Driving Cycle, Lithium-ion Battery, Fuel Cell, Stirling Engine

The logo for SPIM (École doctorale SPIM) features a stylized orange horizontal bar on the left, followed by the letters 'S', 'P', 'I', and 'M' in a large, white, sans-serif font.