

Contribution aux méthodes de gestion et de dimensionnement des véhicules hybrides

Emmanuel Vinot

▶ To cite this version:

Emmanuel Vinot. Contribution aux méthodes de gestion et de dimensionnement des véhicules hybrides. Autre. Communauté Université Grenoble Alpes, 2019. tel-02318564

HAL Id: tel-02318564 https://hal.science/tel-02318564

Submitted on 17 Oct 2019

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.

Communauté UNIVERSITÉ Grenoble Alpes

HABILITATION À DIRIGER LES RECHERCHES

DE LA COMMUNAUTÉ UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : GÉNIE ÉLECTRIQUE

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Emmanuel VINOT

préparée au sein **de l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux** et de l'École Doctorale Électronique, Électrotechnique, Automatique, **Traitement du Signal (EEATS)**

Contribution aux méthodes de gestion et de dimensionnement des véhicules hybrides

HdR soutenue publiquement le **18 juillet 2019**, devant le jury composé de :

Mme Florence Ossart,

Professeur des universités, Sorbonne Université, Paris, Rapporteur

M. Xavier Roboam Directeur de Recherche, ENSEEIHT, Laplace, Toulouse, Rapporteur

M. Joao Pedro Trovao
Professeur des universités, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Rapporteur
M. Alain Bouscayrol
Professeur des universités, Université de Lille, L2EP, Lille, Examinateur
M. François Badin
Chef de Projet, IFP Energie Nouvelle, Solaize, Examinateur
M. Laurent Cerbaud
Professeur des universités, Grenoble-INP, G2elab, Grenoble, Examinateur



Contribution aux méthodes de gestion et de dimensionnement des véhicules hybrides

par

Emmanuel VINOT

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier les stagiaires, thésards, et CDD que j'ai eu l'occasion d'encadrer. Ces travaux n'auraient pas pu se faire sans eux. Merci particulièrement à Vincent Reinbold, Mathias Le-Guyadec, Romain Derollepot et Bilal Kabalan qui ont été fortement impliqués dans une grande partie des travaux présentés dans ce manuscrit.

Je remercie les gens avec qui j'ai collaboré au G2elab et tout particulièrement Laurent Gerbaud avec qui j'ai eu l'occasion de co-encadrer plusieurs stages et thèses présentés dans ce manuscrit. Cette collaboration s'est toujours réalisée avec une très bonne complémentarité au niveau des outils partagés comme de l'encadrement.

Je remercie les membres du Jury :

- Mme Florence Ossart, M. Xavier Roboam et M. Joao Pedro Trovao pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ces travaux
- M. Alain Bouscayrol, M. Francois Badin et M. Laurent Gerbaud pour avoir accepté d'être les examinateurs de ce Jury

Merci à Gérard Meunier pour son aide au niveau de l'école Doctorale EEA et pour la préparation des différents documents (y compris ce manuscrit).

Merci aux membres d'ECO7 (ex : VEH) pour tout ce qui fait la vie d'une équipe.

Merci à Anne Christine Demagny pour la relecture de ce manuscrit en particulier et pour celle de beaucoup d'autres documents.

Merci enfin à mes parents pour la relecture et la correction de ce manuscrit.

Titre

Contribution aux méthodes de gestion et de dimensionnement des véhicules hybrides

Résumé

Depuis leur "lancement" en 1997, les véhicules électriques hybrides n'ont pas cessé de se développer et de plus en plus de modèles sont maintenant disponibles. Des méthodes numériques de dimensionnement des composants et des architectures peuvent cependant encore améliorer leurs performances ou permettre de trouver les meilleurs compromis pour faciliter encore leur développement.

Ce manuscrit présente les travaux effectués pour le développement de méthodes de modélisation et de dimensionnement des véhicules hybrides et de leur composants. Nous partirons des briques élémentaires que sont les modèles des composants et de gestion de l'énergie utiles à la modélisation du système véhicule hybride. Nous proposerons ensuite des méthodologies de dimensionnement et d'optimisation multi-niveaux (architectures/composants/gestion de l'énergie) pouvant permettre, in fine, le choix de la meilleure architecture pour répondre à des objectifs donnés.

Mots clés

Véhicules hybrides, Modélisation, Dimensionnement, Optimisation, gestion de l'énergie.

Table des matières

Glossaire des acronymes	13
Glossaire des notations	17
Introduction générale	19
1. Introduction	21
1.1. Transport routier et Gaz à effet de serre	22
1.1.1 Quelques chiffres niveau mondial	22
1.1.2 Quelques chiffres niveau français	24
1.2. Les véhicules hybrides : généralités	25
1.3. La gestion de l'énergie dans les VEH	26
1.4. Les familles d'architectures de VEH	26
1.4.1 Hybride parallèle	26
1.4.2 Hybride série	27
1.4.3 Hybride série parallèle	28
1.4.4 Hybride à dérivation de puissance	28
1.5. Le dimensionnement des VEH	29
1.6. Présentation de mes travaux	31
2. Modélisation	33
2.1. Introduction	34
2.2. Composants	34
2.2.1 Modèles de moteurs thermiques	35
2.2.1 Modèles de moteurs thermiques 2.2.2 Modèles de moteurs électriques	$\frac{35}{35}$
 2.2.1 Modèles de moteurs thermiques	35 35 36
 2.2.1 Modèles de moteurs thermiques 2.2.2 Modèles de moteurs électriques 2.2.3 Modèles de convertisseurs 2.3. Véhicules 	35 35 36 36
 2.2.1 Modèles de moteurs thermiques 2.2.2 Modèles de moteurs électriques 2.2.3 Modèles de convertisseurs 2.3. Véhicules 2.3.1 Formalisme de modélisation 	35 35 36 36 36
2.2.1 Modèles de moteurs thermiques 2.2.2 Modèles de moteurs électriques 2.2.3 Modèles de convertisseurs 2.3.1 Formalisme de modélisation 2.3.2 Modèles directs sous VEHLIB	35 35 36 36 36 37
 2.2.1 Modèles de moteurs thermiques 2.2.2 Modèles de moteurs électriques 2.2.3 Modèles de convertisseurs 2.3. Véhicules 2.3.1 Formalisme de modélisation 2.3.2 Modèles directs sous VEHLIB 2.3.3 Modèles inverses sous VEHLIB 	35 35 36 36 36 37 38
2.2.1 Modèles de moteurs thermiques 2.2.2 Modèles de moteurs électriques 2.2.3 Modèles de convertisseurs 2.3.1 Véhicules 2.3.1 Formalisme de modélisation 2.3.2 Modèles directs sous VEHLIB 2.3.3 Modèles inverses sous VEHLIB	35 35 36 36 36 36 37 38 39
2.2.1 Modèles de moteurs thermiques 2.2.2 Modèles de moteurs électriques 2.2.3 Modèles de convertisseurs 2.3. Véhicules	35 35 36 36 36 36 37 38 39 39
2.2.1 Modèles de moteurs thermiques 2.2.2 Modèles de moteurs électriques 2.2.3 Modèles de convertisseurs 2.3.1 Véhicules 2.3.1 Formalisme de modélisation 2.3.2 Modèles directs sous VEHLIB 2.3.3 Modèles inverses sous VEHLIB 2.4.1 Robustesse des dimensionnements 2.4.2 Développement de cycles d'usages	35 35 36 36 36 37 38 39 39 39
2.2.1 Modèles de moteurs thermiques 2.2.2 Modèles de moteurs électriques 2.2.3 Modèles de convertisseurs 2.3. Véhicules	35 35 36 36 36 37 38 39 39 39 41
2.2.1Modèles de moteurs thermiques2.2.2Modèles de moteurs électriques2.3.3Modèles de convertisseurs2.3.1Formalisme de modélisation2.3.2Modèles directs sous VEHLIB2.3.3Modèles inverses sous VEHLIB2.4.1Robustesse des dimensionnements2.4.2Développement de cycles d'usages2.5.Conclusion et perspectives	 35 35 36 36 36 37 38 39 39 39 41
2.2.1 Modèles de moteurs thermiques 2.2.2 Modèles de moteurs électriques 2.2.3 Modèles de convertisseurs 2.3.1 Formalisme de modélisation 2.3.2 Modèles directs sous VEHLIB 2.3.3 Modèles inverses sous VEHLIB 2.4.1 Usages 2.4.2 Développement de cycles d'usages 2.5. Conclusion et perspectives 3. La gestion de l'énergie	35 35 36 36 36 37 38 39 39 39 41 43
2.2.1 Modèles de moteurs thermiques 2.2.2 Modèles de moteurs électriques 2.3.3 Modèles de convertisseurs 2.3.1 Formalisme de modélisation 2.3.2 Modèles directs sous VEHLIB 2.3.3 Modèles inverses sous VEHLIB 2.4.1 Robustesse des dimensionnements 2.4.2 Développement de cycles d'usages 2.5. Conclusion et perspectives 3. La gestion de l'énergie 3.1. Introduction	35 35 36 36 36 37 38 39 39 39 39 41 43 44
2.2.1 Modèles de moteurs thermiques 2.2.2 Modèles de moteurs électriques 2.2.3 Modèles de convertisseurs 2.3.1 Formalisme de modélisation 2.3.2 Modèles directs sous VEHLIB 2.3.3 Modèles inverses sous VEHLIB 2.3.4 Usages 2.4.1 Robustesse des dimensionnements 2.4.2 Développement de cycles d'usages 2.5. Conclusion et perspectives 3. La gestion de l'énergie 3.1. Introduction 3.2. Gestion à base de règles	35 35 36 36 36 37 38 39 39 39 41 43 44 45

3 /	Principe du Maximum de Pontryagin	18
2 2	A 1 Principe	18
2 2	4.2 Application aux véhiculos hybridos	40
ບ 2	2.4.2 Trepreter	51
25	Conclusion at perspectives	51
9.0	• Conclusion et perspectives	02
4. I	Le dimensionnement des VEH	53
4.1	. Introduction	54
4.2	2. Etat de l'art sur les méthodes de dimensionnement des VEH	54
4	.2.1 Formulation du problème	54
4	2.2. Couplage dimensionnement/gestion de l'énergie	55
4.3	3. Travaux sur le dimensionnement	58
4	.3.1 Études paramétriques	58
4	A.3.2 Travaux sur les méthodes pour résoudre le couplage dimensionnement/gestion	60
4	A.3.3 Comparaison d'architectures	62
4	A.3.4 Pré-dimensionnement des machines électriques	65
4	.3.5 Méthodes de dimensionnement multi-niveaux topologie/système/ gestion	69
4.4	. Conclusion et perspectives	69
5.]	Fravaux connexes et bilan	71
5.1	. Travaux connexes	72
5	5.1.1 Analyses de sensibilités	72
5	5.1.2 Optimisation de tracés routiers	72
5	5.1.3 Gestion de stockeurs d'énergie stationnaires pour le ferroviaire	73
5.2	2. Bilan	73
Conc	clusion générale et perspectives	77
Bibli	ographie	81
Anne	exes	91
A. I	Polluants atmosphériques	93
A .	1. Pouvoir de Réchauffement Global et Gaz à effet de serre	93
A.	2. Émissions de Polluants et transport : Quelques chiffres niveau français .	93
в. н	Formalisme FLux-effort	97
Ст	Postigire d'architectures hybrides	00
	1 Hybride parallèle	99 00
	$\begin{array}{c} \mathbf{H}_{\mathbf{v}} \mathbf{h}_{\mathbf{v}}$	99 101
	2. Hybride serie	101
C.	4 Hybride à dérivation de puissance	101
0.4		104
D. I	Données des composants de base du véhicule hybride type Clio	107
E. I	Données composants véhicules de base type PRIUS-II	109

F. Articles	111
F.1. Model simulation, validation and case study of the 2004 THS of Toyota	
Prius	111
F.1.1 Composants	112
F.1.2 Comparaison simulation mesures	116
F.2. Optimal sizing of an electrical machine using a magnetic circuit model :	
application to a hybrid electrical vehicle	121
F.3. Building of an electrical machine thermal model in the context of a hybrid	
electric vehicle global optimisation	124
F.3.1 Construction du modèle éléments finis	124
F.3.2 Construction du modèle circuit	126
F.4. Time reduction of the dynamic programming computation in the case of	
a hybrid vehicle	128
F.5. Comparison of different power-split hybrid architectures using a global	
optimisation method	133
F.6. Optimal Energy Management of HEVs with Hybrid Storage System	139
G. Curriculum Vitae Etendu	143
Liste des figures	161
Liste des tableaux	163

Glossaire des acronymes

ACM Association convertisseur machine **ACV** Analyse de cycle de vie **AIXAM** AIX-les-Bains AutoMobiles **ANRT** Agence Nationale de la Recherche Technologique ATER Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherches AS-MA Action Specifique Mécanique d'Accidentologie **BATT** Batterie électrique **BV** Boîte de vitesse **CIFFRE** Convention Industrielle de Formation par la REcherche CITEPA Centre Interprofessionnel Technique d'Etude de la Pollution Atmosphérique **CFT** Compagnie Fluviale de Transport **CONV** Convertisseur électrique statique **CPL** Coupleur mécanique **CR2** Chargé de Recherche 2^{eme} classe DLR Deutsches zentrum für Luft- und Raumfahrt **DEA** Diplome d'Etudes Approfondies **DP** Dynamic Programming, Programmation Dynamique EASE laboratoire Environnement-Aménagement, Sécurité et Eco-conception ECL Ecole Centrale de Lyon **ECM** Energie Conversion Management ECO7 ECO-gestion des Systèmes Energétiques Pour les transports **EMB** Embravage **ENSE**³ Ecole Nationale Supérieure pour l'Eau l'Energie l'Environnement ENSIEG Ecole Nationale Supérieure d'électricité de Grenoble EPI Train EPIcycloïdal **EVALVH** EVALuation des Véhicules Hybrides **EVT** Electrical Variable Transmission, Transmission Variable Electrique ESISAR Ecole Supérieure d'Ingénieurs en Système Avancé et Réseaux ESTACA Ecole Supérieure des Techniques Aéronautiques et de Construction Automobile FCCP Fuel Cell Cargo Pedelec, vélo cargo à pile à combustible FEA Finite Element Analysis FEM Finite Element Model, Modèle par Eléments Finis G2Elab Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble GeePs Laboratoire de Génie Electrique et Electronique de PariS GA Genetic Algorithm, Algorithme Génétique GES Gaz à Effet de Serre **HEV** Hybrid Electric Vehicle **ICAr** Interface for Component ARchitecture IEEE-TVT Transaction on Vehicular Technology

IFSTTAR Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux **INSA** Institut National des Sciences Appliquées

IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor L2EP Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance **Li-ion** Lithium ion (technologie de batteries) LPTN Lumped Parameter Thermal Network, modèle par réseau de résistances thermiques LEG Laboratoire d'électricité de Grenoble LTE Laboratoire Transports et Environnement LEEPCI Laboratoire d'Electrotechnique, d'Electronique de Puissance et de Commande Industrielle de Québec MATCOM MAThematic and COMputer in Simulation **ME** Machine Electrique MEGEVH Modélisation Énergétique et Gestion d'Énergie des Véhicules Hybrides et Electriques MLI Modulation de Largeur d'Impulsion MOS Metal Oxyde Semi-conducteur **MT** Moteur Thermique MTES Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire **MUSE** Modèle Unifié pour les dispositifs et Systèmes Energétiques NdFeBo Néodyme Fer BOre **NEDC** New European Driving Cycle NiMH Nickel Métal-Hydrure NSGA Non-dominated Sorting Genetic Algorithm **PFE** Projet de Fin d'Etude **PHEV** Plug-in Hybrid Electric Vehicle PMP Pontryagin Minimum Principle, Principe du Minimum de Pontryagin **PROMOVAN** PROpulsion et MOtorisation inoVANtes PRG Potentiel de Réchauffement Global **PSAT** Powertrain System Analysis Toolkit **RBF** Radial Basis Function **RED** REDucteur de vitesse **REM** Représentation Energétique Macroscopique **RES** REServoir de carburant **RNM** Reluctance Network Model, modèle par réseau de réluctances **RT3** Recherche Technologique sur les Transports Terrestres SC Super Condensateur **SQP** Sequential Quadratic Programming TEMA laboratoire Technologies pour une Electro-Mobilité Avancée THS Toyota Hybrid System **VE** Véhicule Electrique **VECSIM** développement et Validation d'un outil structuré d'analyse des Emissions de polluants et de la Consommation des véhicules automobiles conventionnels et hybrides, basé sur la SIMulation numérique **VE** Véhicule électrique **VEH** Véhicule Electrique Hybride **VEHLIB** Vehicule Electric Hybrid LIBrary, LIBrairie de Véhicules Electrique et Hybride **VHR** Véhicule Hybride Rechargeable

VNF Voies Navigables de France
VELECTA VEhicule ELECtrique de Technologie Avancée
VPPC Vehicular Power and Propulsion Conference
WLTC Worldwide harmonized Light Vehicles Test Cycle

Glossaire des notations

Notation	Grandeur	unité
λ	multiplicateur de Lagrange indépendant du temps	s.u
a	fonction d'état du système	s.u
d_{carb}	débit de carburant	g/s
E_{0batt}	énergie du pack de batteries	J
$E_{0battelec}$	énergie du pack de batteries en mode électrique	J
J	objectif à minimiser	s.u
J_1^{urb}	consommation sur cycles urbain	$l/100 \mathrm{km}$
J_1^{rout}	consommation sur cycles routier	$l/100 \mathrm{km}$
J_1^{auto}	consommation sur cycles autoroutier	$l/100 \mathrm{km}$
Н	Hamiltonien du système	s.u
I_{batt}	courant du pack de batteries	A
$I_{battelec}$	courant du pack de batteries en mode électrique	A
N_{batt}	nombre de modules (en série)	s.u
SoC	état de charge	%
t_{0-100}	temps d'accélération de 0 à 100 km/h	S
t_{80-120}	temps d'accélération de 80 à 120 km/h	S
t_{dep}	temps de dépassement d'un véhicule	S
t_f	temps final	S
u	vecteur des variables de contrôle	s.u
U_{bat}	tension du pack batterie	V
U_{bus}	tension du bus continu	V
CSP	consommation spécifique du moteur	g/(kW.h)
p(t)	multiplicateur de Lagrange	s.u
P_{mt}	puissance maximale du moteur	kW
V_{max}	vitesse maximale du véhicule	km/h
$V_{max5\%}$	vitesse maximale du véhicule sur une pente à 5%	km/h
x	vecteur d'état du système	s.u

Introduction générale

Dans un contexte de continuelle augmentation des émissions de gaz à effet de serre et de CO_2 notamment, les véhicules hybrides sont une des solutions pour tenter de répondre à la problématique du réchauffement climatique a minima en ce qui concerne le domaine des transports.

De plus en plus de constructeurs proposent des modèles de véhicules hybrides et de véhicules hybrides rechargeables. De plus, les dernières réglementations en termes d'émission de CO_2 pour les flottes des constructeurs devraient encore favoriser leur développement.

La technologie est maintenant à maturité mais des pistes d'amélioration sur le dimensionnement du véhicule, des composants, de la gestion du système et du choix de l'architecture peuvent permettre de faciliter le déploiement des technologies hybrides. Quelques améliorations sont sûrement encore possibles pour faire baisser la consommation de ces véhicules et trouver les meilleurs compromis coût (complexité)/consommation et ainsi favoriser leur déploiement notamment sur des petits modèles de véhicules.

Ces travaux présentent donc des méthodes et outils permettant, in fine, un meilleur dimensionnement des véhicules hybrides. Pour cela, des modèles de composants et de chaînes de traction ont été développés et sont présentés chapitre 2.

Le chapitre 3 présente mes travaux sur la gestion d'énergie de ces véhicules et notamment sur les méthodes de gestion de l'énergie optimales. Les travaux réalisés sur la programmation dynamique et le maximum de Pontryagin sont exposés.

Ensuite le chapitre 4 présente les méthodes développées pour réaliser une optimisation multiniveaux dimensionnement/gestion énergie. Les travaux sur les méthodologies, puis des exemples d'application seront présentés. Les travaux récents sur des méthodes d'optimisation intégrant, en plus, le choix de la topologie de la chaîne de traction dans un processus d'optimisation architectures/dimensionnement/gestion sont aussi brièvement abordés.

Enfin le chapitre 5 présente de façon brève quelques travaux connexes en court et un bilan synthétique de mes activités.

CHAPITRE 1

Introduction

Contenu

1.1. Transport routier et Gaz à effet de serre					
1.1.1 Quelques chiffres niveau mondial	22				
1.1.2 Quelques chiffres niveau français	24				
1.2. Les véhicules hybrides : généralités					
1.3. La gestion de l'énergie dans les VEH	26				
1.4. Les familles d'architectures de VEH	26				
1.4.1 Hybride parallèle	26				
1.4.2 Hybride série	27				
1.4.3 Hybride série parallèle	28				
1.4.4 Hybride à dérivation de puissance	28				
1.5. Le dimensionnement des VEH	29				
1.6. Présentation de mes travaux	31				

1.1. Transport routier et Gaz à effet de serre

1.1.1. Quelques chiffres niveau mondial

Multipliées par 7 depuis le début des années 1950, les émissions de CO_2 mondiales ne cessent d'augmenter fig. 1.1, [1]. Les quelques efforts récemment consentis et réalisés par certains pays n'ont pour l'instant pas réussi à endiguer cette tendance de façon durable. Si quelques rares régions (Europe) ont réussi à diminuer sensiblement leurs émissions, elles se sont au mieux stabilisées ces quinze dernières années en Amérique du Nord et se sont envolées en Chine, devenue le plus gros émetteur de la planète. Même en ramenant les émissions au nombre d'habitants, les pays les plus riches ou au plus fort potentiel de développement restent en moyenne les plus émetteurs de CO_2 fig. 1.2.



FIGURE 1.1. Emissions de Co2 annuelles par région depuis 1751



FIGURE 1.2. Émissions de CO_2 annuelles par habitant et pays en 2016

Toujours au niveau mondial, si l'on regarde la part imputable aux différents secteurs, fig.1.3, la production d'énergie reste de loin la plus émettrice, suivie du secteur des transports. Par ailleurs, aucun secteur, à l'exception de l'agriculture n'a réellement réussi à diminuer ses émissions. Plus représentatif de l'effet de serre, le PRG (Pouvoir de Réchauffement global, cf annexe A.1) permet de comparer les différents secteurs d'activités de façon plus objective qu'en regardant le seul CO_2 . Le constat reste cependant globalement le même fig.1.4. L'agriculture ne fait même plus figure de bon élève. La passivité ou les actions balbutiantes de certains pays, voire de tous les pays, laisse peu d'espoir d'éviter de gros changements climatiques suivis de conséquences graves sur les milieux naturels.



FIGURE 1.3. Émissions de CO_2 mondiales par secteur



FIGURE 1.4. Pouvoir de réchauffement global mondial par secteur

1.1.2. Quelques chiffres niveau français

Le constat est sensiblement différent en France dû à un mix énergétique faible en CO_2 et GES. D'après les chiffres du Citepa [2], les émissions de GES y ont sensiblement diminué depuis les années 2000 (fig.1.5), principalement grâce au secteur de l'énergie et de l'industrie. Les secteurs des transports, de l'agriculture et du tertiaire font donc figure de mauvais élèves et n'ont pas diminué leurs émissions de GES. La part des émissions dues aux transports s'en trouve donc naturellement en perpétuelle augmentation et est devenue prépondérante avec 29 % des émissions de GES.



sources : CITEPA; https://www.citepa.org/fr/

FIGURE 1.5. Pouvoir de réchauffement global annuel en France 1990-2016

Dans ce contexte, la diminution des émissions dues aux transports devient une solution parmi beaucoup d'autres pour tenter d'enrayer le réchauffement climatique et d'améliorer la qualité de l'air. Si les changements d'habitude seraient sûrement le plus fort des leviers, les solutions technologiques peuvent aussi apporter des bribes de solution. Favoriser le développement et la généralisation de véhicules plus électriques (tout électriques ou hybrides) s'inscrit alors naturellement dans le panel des solutions.

Si les véhicules tout électriques sont les plus "vertueux", au minima dans les régions du globe où le mix énergétique est peu carboné, ils ne répondront pas à tous les "besoins" de déplacement en voitures individuelles à court terme ni même, peut-être, à plus long terme. Les véhicules hybrides (et hybrides rechargeables) restent donc une alternative entre le véhicule conventionnel et le tout électrique.

Au niveau réglementaire, les normes européennes ont fait grandement chuter les émissions de polluants des véhicules neufs (hors CO_2) ces 15 dernières années (annexe A.2). Un compromis récent obtenu entre les trois institutions européennes (Commission, Parlement, Conseil de l'UE) sur la réglementation des émissions de CO_2 des voitures et utilitaires légers pour les années 2025 et 2030 à été signé en décembre 2018. Il vise à diminuer les émissions de véhicules particuliers des flottes de constructeur de 15 % en 2025 et 37,5 % en 2030 par rapport à 2021¹, cela devrait favoriser le déploiement de véhicules plus électriques.²

La technologie des véhicules hybrides est maintenant mature et se développe de plus en plus. Il reste néanmoins des pistes d'amélioration au niveau composants (moteurs, machines électriques) et systèmes (gestion, architectures, coût...) susceptibles de faciliter leur développement et leur pénétration sur le marché de l'automobile et dans d'autres domaines, ferroviaire et fluvial notamment.

1.2. Les véhicules hybrides : généralités

On parle de véhicule hybride lorsqu'un véhicule est propulsé par au minimum deux sources d'énergie (fig. 1.6) que l'on peut utiliser simultanément. Les véhicules utilisant alternativement des sources d'énergies différentes sont appelés bi-mode (ex : train diesel, électrique par caténaire). Généralement, au moins l'une des sources d'énergie est réversible et permettra de récupérer une partie de l'énergie cinétique s'il y a lieu. L'autre source d'énergie est souvent non réversible mais possède une forte capacité de stockage. Chaque source d'énergie est associée à un ou plusieurs transformateurs d'énergie lui même réversible ou non. Dans ce manuscrit, nous traiterons majoritairement de véhicules hybrides associant un moteur thermique et son réservoir avec une batterie (BATT), et, un ou plusieurs moteurs électriques (fig. 1.7). D'autres sources peuvent cependant être utilisées, hydrogène (associé à une pile à combustible ou un moteur) ou gaz, par exemple pour la partie non réversible, des super-capacité (SC), un volant d'inertie ou un stockage pneumatique pour la source réversible. Cette source peut elle même être hybride; BATT + SC par exemple.



FIGURE 1.6. Principe architectures hybrides



FIGURE 1.7. Architectures hybrides moteur thermique/batterie

^{1. 15 %} en 2025 et 31 % en 2030 par rapport à 2021 pour les utilitaires légers, en discussion pour les véhicules lourds.

^{2.} Attention, la prise en compte des véhicules émettant moins de 50 g de CO_2/km est calculée par un facteur Zlev (Zero and low emissions véhicles).

1.3. La gestion de l'énergie dans les VEH

A partir du moment où au moins deux sources d'énergie peuvent être utilisées pour propulser un véhicule, plusieurs chemins de transfert d'énergie (flux d'énergie) existent. Ces sources peuvent être utilisées séparément ou simultanément et échanger ou non de l'énergie. Le choix des flux d'énergie est communément appelé gestion de l'énergie. Dans notre cas, il s'agit principalement de faire le choix entre les modes électriques ou hybrides (batterie et moteur thermique sont sollicités). Dans le mode hybride, il faudra, de plus, choisir la quantité d'énergie échangée entre batterie et moteur thermique. Dans certaines architectures, il faudra, de plus, faire le choix du mode hybride et/ou du point de fonctionnement du moteur thermique.

Les lois de gestion de l'énergie peuvent être formulées à base de règles ou de principes basés sur la commande optimale (chapitre 2). Elle devront également gérer l'état de charge de la batterie pour garantir une certaine décharge de celle-ci sur un parcours ou un temps donné. Si la batterie ne se décharge globalement pas au cours du temps, nous aurons des véhicules hybrides non rechargeables (HEV), ce sera le cas dans tous les exemples de ce mémoire. Si la batterie se décharge au cours du temps nous parlerons alors d'hybrides rechargeables (PHEV). La batterie peut alors être rechargée grâce au réseau électrique, une autre source d'énergie que l'essence peut donc être utilisée.

1.4. Les familles d'architectures de VEH

Le terme d'architecture hybride décrit en général la manière dont les transformateurs d'énergies sont reliés entre eux et aux roues, couplage électrique et mécanique dans notre cas (fig. 1.7). Il existe plusieurs manières de réaliser ces connexions qui définissent les grandes familles d'architectures hybrides [3-5]. Celles-ci sont décrites brièvement dans les paragraphes qui suivent. Un bestiaire plus complet, sans être exhaustif, d'architectures existantes ou pouvant exister est présenté annexe C ainsi que quelques indications sur les modèles commercialisés.

1.4.1. Hybride parallèle

La famille des hybrides parallèles (fig. 1.8) décrit les architectures dont les transformateurs d'énergie (moteurs thermiques et électriques) sont mécaniquement reliés aux roues. Leur vitesse dépend donc directement de celles des roues par l'intermédiaire de rapports de réduction (réducteurs, coupleurs, boîte de vitesses ...). Elles possèdent, en général, un moteur thermique (MT) et une machine électrique (ME). Selon la position de cette machine électrique on parlera d'architecture de type P0 à P4 (fig. 1.8). Ces machines peuvent être reliées aux roues ou à l'arbre de transmission par l'intermédiaire de coupleur (CPL) ou directement montées sur l'arbre (cas P3 sur la figure). Les hybrides parallèles dits "par la route" [6, 7] font également partie de cette famille (architecture P4 sur la figure). Des architectures plus complexes avec une machine électrique connectée sur certains rapports de la boîte de vitesses ont également été brevetées ou étudiées [8, 9].



FIGURE 1.8. Les hybrides parallèles

1.4.2. Hybride série

Dans les architectures hybrides série, le moteur thermique n'est pas mécaniquement relié aux roues (fig. 1.9). Son point de fonctionnement, et notamment sa vitesse, peut donc être choisi indépendamment de la vitesse des roues. Cela se fait cependant au prix d'une chaîne de rendement (ME2, ME1, réducteur) souvent très défavorable par rapport à une transmission mécanique directe, du moins pour des utilisations dans des véhicules routiers particuliers. Ces architectures présentent cependant une grande souplesse au niveau "propulsion" qui est assurée par une ou plusieurs machines électriques. Par ailleurs, pour des applications où la consommation électrique à bord du véhicule est importante, voire prépondérante, le moteur thermique et sa machine électrique associée assurent aisément la fonction de groupe électrogène. On les retrouve dans les locomotives (alors appelées diesel électrique), certains bateaux et dans les véhicules dits électriques avec range-extender.



FIGURE 1.9. Les hybrides séries

1.4.3. Hybride série parallèle

La famille des Hybrides Séries Parallèles (HSP), [10 - 14] possède, dans sa version la plus simple, au minima un moteur thermique et deux machines électriques (fig. 1.10). Un ou plusieurs organes de coupure (embrayages) permettent alors de faire fonctionner le véhicule soit en mode parallèle, soit en mode série. La figure 1.10 présente la version la plus simple d'HSP (dite P2+P3), on peut y adjoindre des réducteurs ou boîtes de vitesses et placer les convertisseurs d'énergie à d'autres emplacements (voir annexe C). Le choix précis de l'architecture (rapports de réduction, place des convertisseurs) devient alors un problème à part entière (cf chapitre 4). Par ailleurs, les lois de gestion de l'énergie devront aussi faire le choix du mode de fonctionnement (parallèle ou série) et de la répartition de la puissance électrique entre les deux machines électriques.



FIGURE 1.10. hybrides séries-parallèles

1.4.4. Hybride à dérivation de puissance

Ce type d'architecture [15-18] permet de faire transiter une partie de la puissance du moteur thermique de façon mécanique vers les roues et de dériver une partie de cette puissance par l'intermédiaire d'un train épicycloïdal (EPI) vers des machines électriques qui fonctionneront de manière duale (annexe F.1), l'une en génératrice l'autre en moteur. La figure 1.11 représente la plus connue de ces architectures puisqu'elle équipe les véhicules de la marque Toyota. D'autres exemples sont fournis annexe C. La dérivation de puissance, associée au train épicycloïdal permet comme dans un hybride série de choisir le point de fonctionnement du MT de façon quasi indépendante de celle des roues et donc de le faire fonctionner dans des zones de bon rendement. Cela nécessite cependant de faire passer une partie de la puissance dans une chaîne de rendement peu favorable (EPI, ME2, ME1). Là aussi, les lois de gestion de l'énergie devront réaliser le choix du point de fonctionnement en veillant à garantir une bonne efficacité globale du système. Les architectures de type Electrical Variable Transmission (EVT, annexe C), font aussi partie de cette famille et permettent la dérivation de puissance sans utilisation de train épicycloïdal en utilisant des machines électriques à "stator tournant" [19-22].



FIGURE 1.11. Hybride à dérivation de puissance type Toyota

1.5. Le dimensionnement des VEH

Même si les véhicules électriques hybrides (VEH) sont maintenant une technologie mature qui se développe de plus en plus, il reste néanmoins des pistes d'amélioration susceptibles de faciliter leur développement et leur pénétration sur le marché de l'automobile. Parmi ces pistes d'amélioration, une approche "globale" du dimensionnement peut permettre de créer des véhicules plus performants (consommation), moins chers, plus adaptés à leurs missions...



FIGURE 1.12. Le dimensionnement des VEH

Comme tout système complexe, le dimensionnement d'un véhicule hybride fait appel à plusieurs aspects souvent imbriqués et interagissant fortement (fig.1.12), [23]. De forts liens existent, en effet, entre les performances des composants, l'usage du véhicule, la gestion de l'énergie et l'architecture utilisée :

• L'usage du véhicule et, notamment, les performances souhaitées (temps d'accélération maximal, autonomie et mode tout électrique) fixera des contraintes sur les composants (1). Par ailleurs, il imposera (avec la gestion de l'énergie), le fonctionnement des composants et notamment du moteur

thermique donc la consommation (1). Selon l'usage et la catégorie de véhicule (petit citadine, grosse berline), certaines architectures seront plus ou moins bien adaptées en termes de consommation, mais aussi de coût et de confort (2). Enfin, la gestion de l'énergie sera évidemment impactée par le cycle d'usage (urbain extra urbain) et l'autonomie souhaitée en mode électrique (5). Sachant que la gestion du véhicule peut également se décliner en termes d'éco-conduite et elle même impacter l'usage (3).

- Le choix de l'architecture de la chaîne de traction guidera fortement le dimensionnement des composants (4) ainsi que leur fonctionnement (zone d'utilisation). La gestion de l'énergie pourra également être très différente selon les architectures (6).
- Enfin, une forte interaction existe entre le dimensionnement des composants et la gestion de l'énergie qui, avec l'usage du véhicule, fixent les zones de fonctionnement des composants (7). En même temps, les caractéristiques des composants (zones de meilleur rendement notamment) peuvent amener les algorithmes de gestion de l'énergie à choisir des points de fonctionnement des composants et du système qui soient le plus efficaces possibles (8).

Toutes ces interactions risquent de rendre des approches séquentielles de dimensionnement sousoptimales et l'on préférera souvent un dimensionnement "global" du système, des composants et de la gestion [23, 24].

On peut alors représenter le dimensionnement d'un véhicule hybride comme un ensemble de briques et de méthodes imbriquées les unes dans les autres (fig. 1.13)



FIGURE 1.13. Le dimensionnement des véhicules hybrides

Le dimensionnement fait alors appel à un certain nombre de briques de bases telles que :

- Des modèles de composants qui peuvent être simples (type cartographie de rendement par exemple) ou plus compliqués (faisant intervenir les dimensions des composants)
- Des modèles d'usage du véhicule au sens large : conditions d'utilisation (urbaine, extra urbaine ...), mais aussi performances max, confort de conduite, etc.
- Des méthodes de gestion de l'énergie

Ces briques "élémentaires" permettront de construire des modèles systèmes de l'architecture de la chaîne de traction du véhicule. Ces modèles permettront de calculer les performances du véhicule, qui seront souvent des contraintes, mais aussi la consommation que l'on souhaitera généralement minimiser.

Avec ces modèles systèmes nous pourrons alors passer au dimensionnement d'une architecture en fonction d'un certain nombre de critères, de contraintes et de variables. Nous utiliserons souvent pour cela une brique comprenant des méthodes d'optimisation. A noter que la gestion de l'énergie peut, soit être une brique du modèle système, soit être incluse dans la brique optimisation (paramètres d'optimisation). De même, au niveau composants, l'on peut, soit utiliser des variables "systèmes" (couples, vitesse, puissance max...) et dimensionner les composants dans un second temps, soit utiliser des modèles dimensionnants pour avoir au moins un pré-dimensionnement assez précis de ces composants.

Comme indiqué paragraphe 1.4, plusieurs familles d'architectures hybrides existent et au sein d'une même famille plusieurs "variantes" existent aussi. Il faut donc, là aussi, faire un choix de la topologie de la chaîne de traction. Une brique de génération de ces topologies peut alors être utilisée conjointement à une brique de modélisation automatique de ces architectures.

Enfin, tout ce processus peut se retrouver englobé dans un processus de dimensionnement plus global d'un système de transport décrivant aussi les infrastructures par exemple et prenant en compte des critères plus globaux de type Analyse de Cycle de Vie (ACV).

1.6. Présentation de mes travaux

Depuis mon recrutement, mes travaux ont très majoritairement porté sur cette approche globale du dimensionnement. La figure 1.14 montre l'évolution chronologique de ces travaux depuis mon recrutement ainsi que la façon dont ils seront présentés dans ce mémoire. Les domaines d'activités sont "triés" par couleurs (voir le bandeau du haut). Les stagiaires, CDD et doctorants ayant participé ou réalisé ces travaux sont indiqués par leurs initiales (en rouge) sans forcément respecter la chronologie.

Ces travaux ont débuté par le développement des briques nécessaires à une approche globale du dimensionnement et notamment par la modélisation des composants, des véhicules et de l'usage (chapitre 2). Des premières méthodes de gestion de l'énergie basées sur des règles ont également été développées et validées (chapitre 3). Ces travaux se sont ensuite poursuivis en développant des méthodes optimales de gestion de l'énergie (chapitre 3) et en les appliquant à différentes architectures. Ils se sont poursuivis avec des travaux sur le dimensionnement optimal des architectures hybrides (chapitre 4) et le développement de modèles dimensionnants de composants (chapitre 2). Enfin, plus récemment ; des travaux ont débuté sur l'optimisation de la topologie des architectures hybrides et notamment la génération de ces architectures (chapitre 4) et leur modélisation. Des activités connexes ont également émergé de ces travaux. Elles concernent notamment l'usage des véhicules (chapitre 2), des études de sensibilité de nos modèles (chapitre 5) et l'éco-conception des routes (chapitre 5).

CHAPITRE 1. INTRODUCTION



FIGURE 1.14. Travaux et plan du manuscrit

CHAPITRE 2

Modélisation

Contenu

2.1. Introduction				
2.2. Composants				
2.2.1 Modèles de moteurs thermiques $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 35$				
2.2.2 Modèles de moteurs électriques				
2.2.3 Modèles de convertisseurs				
2.3. Véhicules				
2.3.1 Formalisme de modélisation				
2.3.2 Modèles directs sous VEHLIB				
2.3.3 Modèles inverses sous VEHLIB				
2.4. Usages				
2.4.1 Robustesse des dimensionnements				
2.4.2 Développement de cycles d'usages				
2.5. Conclusion et perspectives 41				

 $\underline{Préambule}$: Ce chapitre se réfère à trois articles dont des résumés sont présentés en annexe F. Leur lecture n'est pas indispensable à la compréhension des travaux.

- l'article "Model simulation, validation and case study of the 2004 THS of Toyota Prius" annexe
 F.1, présente plus en détails les méthodologies de mesure et de modélisation du système et de la gestion d'énergie de la Prius II.
- l'article "Optimal sizing of an electrical machine using a magnetic circuit model : application to a hybrid electrical vehicle" annexe F.2 présente rapidement les travaux de Vincent Reinbold sur le développement d'un modèle à base de réseau de réluctances de machines électriques à aimants enterrés.
- l'article "Building of an electrical machine thermal model in the context of a hybrid electric vehicle global optimisation" annexe F.3 présente rapidement les travaux de Mathias Le-Guyadec sur le développement d'un modèle thermique de machines électriques à aimants enterrés à base de réseau de résistances.

2.1. Introduction

Dans l'optique de réaliser des modèles de véhicules, on peut choisir de se baser sur des briques "élémentaires" composées notamment de modèles de composants [23], et de l'usage (fig.1.13). Des briques élémentaires de la taille des composants et des lois d'interconnexion (basées sur un formalisme flux-effort) [25] permettront d'utiliser ces modèles au niveau système, et permettront de passer facilement d'un type de composant à un autre (différents types de machines électriques ou de moteurs thermiques) ou d'un type de modèle de composants à un autre (méta-modèle, modèle circuit ...). Tant que possible, nous veillerons aussi à ce que le "type" de modèle soit indépendant du jeu de données associées (un moteur essence et un moteur diesel pourront par exemple être modélisés de la même façon mais avec des jeux de données différents). Les modèles utilisés au niveau "système" devront être relativement rapides en restant le plus précis possible. Différents niveaux de modélisation (éléments finis, modèles circuit) pourront permettre la génération et la validation de ces modèles (voir §2.2.2).

Ce chapitre présente d'abord une première partie portant sur les modèles des composants et particulièrement les moteurs thermiques (§2.2.1), les machines électriques (§2.2.2) et les convertisseurs (§2.2.3). Les autres composants sont décrits de façon très classique, le châssis des véhicules par des lois simples faisant intervenir l'aérodynamique, les réducteurs et boîte de vitesses par des rendements constants. La deuxième partie du chapitre concerne les modèles de véhicules et particulièrement les développements réalisés sous la bibliothèque VEHLIB développée dans l'équipe VEH de l'Ifsttar (§2.3). La dernière partie présente la modélisation de l'usage des véhicules et des premiers éléments concernant la robustesse des dimensionnements au regard des cycles d'usages utilisés §2.4).

2.2. Composants

Mes travaux sur les composants ont revêtu deux aspects. L'un consiste à obtenir des cartographies des composants (consommation de carburant ou pertes dans le plan couple/vitesse) à partir de résultats de mesure, l'autre à développer des modèles de composants pouvant être utilisés tels quels dans un processus de dimensionnement ou permettant la génération de cartographies.

2.2.1. Modèles de moteurs thermiques

Les modèles de moteurs thermiques que nous utilisons et développons sont principalement basés sur des cartographies obtenues à partir de mesures. Ces mesures peuvent être réalisées sur un banc moteur ([26]) mais aussi, in situ, ce qui peut présenter des difficultés au niveau mesures (composants dans son système). Mesurer in-situ certaines grandeurs et balayer toute la cartographie moteur devient parfois très compliqué. Ainsi, lors du projet EVALVH, la cartographie du moteur thermique à été réalisée à partir des essais du véhicule sur le banc à rouleau du LTE [27, 28]. Les points clé de ces mesures ont été la mesure précise du couple moteur (à l'aide de bougies mesurant la pression interne des cylindres) et le balayage, lors d'essais stabilisés, de tout le domaine couple/vitesse du moteur thermique. L'annexe F.1 décrit précisément ces mesures. Dans le projet PROMOVAN [29, 30], nous avons rencontré le même type de difficulté (mesure du couple et balayage de tout l'espace couple/vitesse) pour des moteurs d'embarcations fluviales ([29]). Des mesures ont été réalisées in-situ, ce qui oblige à rester sur la courbe d'hélice (§2.4.2, fig. 2.3). Un couplage mesures/modélisation (droites de Willans [31]) a été nécessaire pour déterminer la consommation sur l'ensemble du domaine potentiel de fonctionnement du moteur thermique.

2.2.2. Modèles de moteurs électriques

Ces travaux sur les machines électriques ont été réalisés en étroite collaboration avec le G2elab et Laurent Gerbaud notamment à travers le co-encadrement de différents stages [32], de projets de 2^{eme} année, et surtout lors des thèses de Vincent Reinbold [33] et Mathias Le-Guyadec [34]. Le but était de disposer de modèles dimensionnants de machines électriques en remplacement des méta-modèles (cartographies) utilisés généralement dans les simulations système, mais, par nature, difficiles à relier à la géométrie des machines, et dont l'utilisation découple le dimensionnement du système de celui des composants.

Lors de ces travaux, des modèles magnétiques [35] puis thermiques [36] de machines synchrones à aimants permanents enterrés ont été développés. Ces modèles, dont la finalité est d'être utilisés dans un processus global de dimensionnement des Véhicules Electriques Hybrides (VEH), doivent être précis tout en restant suffisamment rapides pour être appelés plusieurs milliers de fois lors de l'optimisation du système. Pour concevoir et réaliser ces modèles, plusieurs niveaux et granularités (finesse du modèle) ont été utilisés (fig. 2.1). Des études et modèles magnétiques et thermiques ont d'abord été réalisés avec un logiciel éléments finis (Flux) et validés par l'intermédiaire de résultats expérimentaux (mesures IFSTTAR ou la littérature), sur différents points de fonctionnement. Des modèles de type réseau de réluctances (RNM) [37] pour la partie magnétique et réseau de résistances (LPTN) [38, 39] pour la partie thermique ont ensuite été développés et validés grâce au modèle éléments finis sur différents points de fonctionnement et différents dimensionnements. Par exemple, la modélisation des flux magnétiques au niveau de l'extrémité des aimants (forte saturation), n'a pu être correctement représentée par des réluctances qu'avec l'aide de méthodes de type éléments finis. De même, les échanges thermiques au niveau des têtes de bobines et des encoches, et notamment la circulation des principaux flux de chaleur obtenue avec Flux, ont permis d'améliorer grandement le modèle thermique. Ces modèles sont maintenant disponibles dans VEHLIB et peuvent être utilisés en tant que tels ou permettre de générer des cartographies. (voir chapitre 4 paragraphe 4.2). Pour plus de détails sur ces travaux et le développement et la validation de ces modèles voir annexes F.2 et F.3.


FIGURE 2.1. Les modèles pour les machines électriques

2.2.3. Modèles de convertisseurs

Des modèles de convertisseurs statiques simples sont pour l'instant utilisés. Ils permettent de calculer de façon analytique les différents types de pertes (conduction et commutation) dans les semiconducteurs en fonction :

- de la fréquence de découpage,
- du courant commuté à chaque commutation (hypothèse d'un courant sinusoïdal),
- de la tension du bus DC,
- des caractéristiques des composants (résistances internes, temps et charges de recouvrement ...) issues de données constructeur pour des MOS ou des IGBT
- du nombre d'interrupteurs en parallèle

Ces modèles ne sont pas dimensionnant, à l'exception du nombre d'interrupteurs en parallèle. Des modèles faisant intervenir le volume de semi-conducteur en fonction des tensions et courants sont à développer et à utiliser dans nos modèles et processus de dimensionnement. De même que pour les machines électriques, des modèles thermiques liés à des contraintes d'échauffement sont aussi à développer.

2.3. Véhicules

2.3.1. Formalisme de modélisation

Au niveau des véhicules hybrides, plusieurs logiciels ou outils existent permettant la simulation des véhicules hybrides, on notera notamment :

- Simcenter-Amesin, développé par LMS-imagine basé sur un formalisme proche du bond graph et spécialisé dans la modélisation système multiphysique 1D.
- PSAT, librairie simulink développée par le laboratoire Argonne dédiée aux chaînes de tractions de véhicules [40].
- la REM, formalisme graphique pour la représentation synthétique de systèmes énergétiques multidisciplinaires développée au laboratoire L2EP de Lille permettant notamment la simulation et la commande des véhicules électriques et hybrides [41, 42].
- VEHLIB, librairie simulink développée dans l'équipe VEH de l'Ifsttar pour la simulation et la gestion des chaînes de traction électriques, hybrides et conventionnelles.

Ces outils sont tous basés sur des "bibliothèques" de composants qu'il s'agit ensuite de connecter. Elles utilisent pour cela des formalismes de type bond graph ou, a minima, dit bond graph de niveau 0 [26]. Au moins au niveau des interconnexions entre les composants, ces librairies utilisent un formalisme de type flux-efforts avec des grandeurs fixées pour chaque domaine de la physique (voir annexe B).

On distingue par ailleurs deux types de formalisme [25] dits direct (ou causaux ou forward) et inverse (a-causaux ou backward). Dans le domaine de la modélisation des véhicules hybrides, les modèles directs vont des causes vers les effets, soit des couples des machines à la vitesse du véhicule. Les modèles inverses permettent de remonter de la vitesse du véhicule aux couples et consommations des moteurs thermiques et des organes de stockage.

Les modèles directs permettent de développer "facilement" les commandes du système au niveau "management" mais aussi au niveau contrôle rapproché et prendront facilement en compte les limitations du système et des composants. Ces modèles (développés sous simulink dans notre cas) sont par contre coûteux en temps de calcul et peu exploitables dans des processus de dimensionnement.

Les modèles inverses seront eux, plus rapides, mais ne tiendront généralement pas compte des commandes rapprochées et, si l'on rencontre une limitation au niveau d'un composant en remontant la chaîne de traction, il faudra, soit interrompre la simulation (cycle de conduite irréalisable), soit repartir dans le sens direct. Ces modèles restent cependant extrêmement utilisés dans le domaine des véhicules hybrides pour le développement des lois de gestion de l'énergie optimale (chapitre 3).

2.3.2. Modèles directs sous VEHLIB

L'équipe VEH travaille depuis plus de 15 ans au développement de la bibliothèque VEHLIB (Librairie de Véhicules Electriques et Hybrides) [25]. Cette bibliothèque était initialement développée sous simulink pour réaliser des modèles directs. Les outils de mesures disponibles à l'Ifsttar [26, 28] permettent de caractériser précisément un certain nombre de composants et de valider ensuite nos modèles de véhicules (et les lois de gestion de l'énergie associées).

Mes travaux ont permis d'intégrer dans cette bibliothèque les modèles directs des architectures hybrides à dérivation de puissance de type Toyota (PRIUS et autre) [27], hybride parallèle 1 embrayage (type Honda Insight), et hybride Série-Parallèle [43]. Les modèles des composants issus des mesures du projet EVALVH ainsi que les lois de gestion de type empirique, déduites de ces mesures, ont permis de développer et de valider ces modèles [28, 44] (consommation et gestion d'énergie) et d'obtenir des résultats très proches des mesures (erreur < à 5 %). Pour plus de détails sur le développement et la validation des modèles et lois de gestions voir annexe F.1. Les modèles des composants, une fois validés, ont été réutilisés, dans de nombreuses études pour développer ou comparer des architectures hybrides (voir chapitre 4).

2.3.3. Modèles inverses sous VEHLIB

Dans un second temps, mes travaux au niveau des modèles véhicules ont porté sur le développement de modèles inverses dans VEHLIB. Les modèles des composants restent assez simples, la difficulté réside dans l'implémentation des lois de gestion de l'énergie optimale en utilisant des méthodes de type Programmation Dynamique (DP) ou Principe du Maximum de Pontryagin (PMP), (chapitre 3). La quasi totalité des architectures de véhicules hybrides terrestres à ainsi été implémentée dans le logiciel (hybride parallèle, hybride à dérivation de puissance [18], EVT [21], hybride série parallèle [45]. Avec Romain Derollepot lors du projet PROMOVAN, nous avons aussi développé des architectures plus complexes dédiées aux embarcations fluviales (fig. annexe C.6), [46].

Pour l'instant, nous avons développé un modèle (et les routines associées) pour chaque type d'architecture. Dans la thèse de Bilal Kabalan (fin en 2020), nous nous penchons sur le choix amont de l'architecture du véhicule et l'optimisation au niveau topologique. Il nous faudra alors évaluer et simuler un grand nombre d'architectures issues de processus de génération automatique (§4.3.5). Nous développons donc actuellement un modèle "unique" pouvant simuler toutes les architectures hybrides ou du moins, dans un premier temps, toutes les architectures de type série-parallèle générées avec un certain nombre de composants. La figure 2.2 illustre la complexité de ce problème. Une architecture de type série-parallèle possède au moins deux machines électriques qui peuvent être placées n'importe où dans les positions P0 à P4 sur la figure, de plus une ou des boîtes de vitesses et des coupleurs et réducteurs peuvent aussi venir s'intercaler. Le nombre de combinaisons devient donc vite trop important pour développer un modèle pour chaque architecture "à la main". Un modèle basé sur des modes de fonctionnement (hybride série, hybride parallèle avec une ou deux machines ...) est donc en cours de réalisation.



FIGURE 2.2. Les hybrides séries-parallèles

2.4. Usages

Une donnée fondamentale dans un processus de dimensionnement des systèmes et particulièrement des VEH, est la connaissances de leurs usages et notamment de profils de vitesse qui permettent de simuler leur consommation d'énergie de façon représentative de la réalité [23, 47].

Dans nos études, nous utilisons le plus souvent des cycles d'usages type Artémis [48] ou normalisés développés par ailleurs pour des véhicules routiers et des voitures particulières. La question se pose alors de la robustesse ou de la sensibilité des résultats obtenus (dimensionnement notamment) aux cycles utilisés pour réaliser ce dimensionnement.

Par ailleurs, pour des véhicules d'autres types nous ne pouvons pas utiliser ces cycles. Les cas des véhicules électriques sans permis (projet VELECTA) ou du projet PROMOVAN (bateaux fluviaux) ont nécessité que nous développions au préalable nos propres cycles d'utilisation (voir paragraphe 2.4.2).

2.4.1. Robustesse des dimensionnements

Dans la thèse de Vincent Reinbold ([33]) nous nous sommes interrogés sur l'influence que peut avoir le ou les cycles de conduite sur le dimensionnement du véhicule et des composants (machine électrique notamment), et donc sur la robustesse de nos méthodes de dimensionnements. Nous avons réalisé des dimensionnements optimaux (chapitre 4) de véhicules hybrides parallèles, et de la machine électrique associée, sur différents cycles urbains, routiers et autoroutiers et sur un cycle réalisé à partir d'une pondération des trois usages (§4.3.3). Nous avons ensuite re-simulé les véhicules obtenus sur les cycles pour lesquels ils n'avaient pas été dimensionnés. Pour une optimisation en zone urbaine, un dimensionnement sur un cycle de type Artémis urbain semble le plus robuste et présente des consommations très proches de celles obtenues pour des dimensionnements optimaux sur d'autres cycles urbains (Hyzem, ece15). Des dimensionnements pour des usages différents (urbains, routiers ou autoroutiers) présentent des différences restant globalement assez faibles et seul un dimensionnement sur cycle purement autoroutier semble inapproprié : surconsommation sur les autres cycles jusqu'a 4% et composants surdimensionnés (moteur thermique 25 % plus gros). Les cycles utilisés pour des véhicules terrestres de type voiture particulière mènent donc à des dimensionnements qui semblent assez robustes (exception faite des cycles ECE 15 et Artémis autoroutier).

2.4.2. Développement de cycles d'usages

Lors des travaux de Romain Derollepot [29, 49] nous avons mis en place des méthodes de générations de cycles courts à partir du monitoring réalisé sur des embarcations fluviales. Cela a permis de synthétiser, avec des cycles de quelques minutes, plusieurs jours de mesures et de représenter de façon "énergétiquement" correcte les efforts et puissances sur les arbres moteurs principaux et la consommation énergétique des auxiliaires de bord et du propulseur d'étrave (fig. 4.3). Pour cela, nous avons utilisé la méthode présentée figure 2.3. Nous possédons la courbe d'hélice que nous avons caractérisée à l'aide de mesures "stationnaires" [30]. Cette courbe nous montre que le couple à développer sur l'hélice est au carré de sa vitesse de rotation. Les vitesses de rotation enregistrées pendant la campagne de mesures sont alors triées par classe de vitesse et nous déterminons les temps passés en % dans chacune de ces classes de vitesse. La puissance moyenne des points d'une classe de vitesse est alors calculée et "reportée" sur la courbe d'hélice. A partir de là un cycle est généré en classant arbitrairement les vitesses par ordre croissant. Comme nous ne tenons pas compte des dynamiques, l'ordre des paliers de vitesse a peu d'importance. Un cycle de 7200 s a été développé car ce temps est représentatif du temps de croisière entre deux écluses où l'on retrouve alors une phase de manœuvre. La puissance du propulseur d'étrave a également été classée en sachant que ce propulseur ne fonctionne quasi exclusivement que pendant les phases de manœuvres (propulseurs principaux débrayés). Enfin la puissance des auxiliaires de bord à également été classée, répartie par puissances ascendantes mais avec une fréquence 10 fois supérieure à celle du cycle principal. Cette fréquence (période de 12 minutes) correspond notamment au passage des ponts et à la levée de la timonerie. Ces cycles ont été validés d'un point de vue énergétique, par rapport à l'ensemble de la période de mesures. Les erreurs sur la consommation et les puissances de ce cycle et les mesures sont quasi nulles. Ces cycles ont ensuite été utilisés pour réaliser le dimensionnement d'architectures hybrides "fluviales" (§4.3.1).

Ces cycles sont assez simples à réaliser et la lenteur des dynamiques de ce type de système justifie qu'elles soient négligées (des premiers modèles directs ont permis de le vérifier). Le choix des classes a lui aussi été, sur ce projet, assez empirique. Pour des systèmes plus complexes, avec éventuellement des dynamiques plus fortes, des méthodes d'optimisation du choix de ces classes peuvent alors être utilisées [23].

A noter que sur le projet Velecta une méthode assez similaire avait été appliquée mais basée sur un enchaînement de mini-cycles composés de paliers et de transitions représentatives des dynamiques de vitesse. Le choix de ces cycles restait cependant "artisanal" et nécessitait une bonne pratique et plusieurs essais.



FIGURE 2.3. création de cycle pour embarcations fluviales

Plusieurs pistes de travaux pourraient être développées concernant l'usage des véhicules en fonction des applications et des points que l'on souhaite étudier :

- l'éco-conduite des véhicules hybrides et hybrides rechargeables et son interaction avec la gestion énergétique du véhicule et avec le dimensionnement. Des travaux en ce sens devraient prochainement démarrer.
- la robustesse des dimensionnements par rapport au cycle d'usage pourrait aussi être approfondie. Générer des cycles "aléatoires" par des méthodes stochastiques mais basées sur l'apprentissage pourrait être une solution notamment dans les cas où l'on dispose de suffisamment de mesures. Cela pourrait être fait avec les données du projet Promovan par exemple pour valider a posteriori nos hypothèses.

2.5. Conclusion et perspectives

Des méta-modèles de composants (moteur thermique et électriques) ont dans un premier temps été développés généralement à partir de mesures pour alimenter nos modèles complets de véhicules (§2.2) Ils ont permis de développer sous VEHLIB des modèles directs (Simulink) et inverses (Matlab) d'un nombre important de véhicules hybrides terrestres voire fluviaux (§2.3). Des développements de modèles dimensionnants des machines électriques ont ensuite été réalisés (§2.2.2) pour affiner les dimensionnements du système et de ces composants dans un processus "global" et multi-niveau (chapitre 4). L'usage des véhicules a également été étudié en regardant l'influence des cycles sur le dimensionnement (§2.4.1) et en développant des cycles "dédiés" pour certains types de véhicules (§2.4.2)

Nous nous sommes, pour l'instant, focalisés sur la modélisation avec des modèles dimensionnants des machines électriques synchrones. D'autres types de machines électriques pourraient être modélisées, synchrones bobinées et asynchrones notamment. Des études sur l'impact environnemental des machines électriques pourraient aussi être réalisées. Elles permettraient notamment de prendre en compte l'impact des aimants terre rares, et de comparer les machines utilisant ces aimants à d'autres types de machines (synchrones bobinées, asynchrones ...). Par ailleurs, d'autres composants de la chaîne de traction pourraient aussi être modélisés de façon plus précise pour remplacer les méta-modèles actuellement utilisés. On peut notamment citer :

- Les convertisseurs d'électronique de puissance (onduleurs particulièrement), et leur commande, pour l'instant considérée de façon trop simpliste (MLI intersective, fréquence de découpage constante, ...).
- Les engrenages et boîte de vitesses : dans certaines architectures, on peut retrouver ou souhaiter insérer plusieurs rapports de réductions (architectures type série-parallèle), le rendement de ces étages de réduction devient parfois un paramètre énergétiquement important. Il serait utile de modéliser cela avec un rendement non constant et dépendant du couple de la vitesse et du rapport de réduction.
- Les moteurs thermiques : la prise en compte de meilleurs compromis énergie/pollution a déjà commencé dans l'équipe. Une thèse portant sur l'optimisation du moteur thermique et de sa commande, couplée avec le dimensionnement et la gestion du système est en cours et permettra de développer des modèles plus précis des moteurs et des dispositifs de dépollution. Ces travaux pourraient se poursuivre en couplant ces modèles avec ce que nous avons réalisé sur les machines électriques et le dimensionnement système.

CHAPITRE 3

La gestion de l'énergie

Contenu

3.1. Introduction	
3.2. Gestion à base de règles	
3.3. Programmation Dynamique 46	
3.4. Principe du Maximum de Pontryagin	
3.4.1 Principe	
3.4.2 Application aux véhicules hybrides	
3.4.3 Travaux	
3.5. Conclusion et perspectives	

<u>Préambule</u> : Ce chapitre se réfère à deux articles dont des résumés sont présentés en annexe. Leur lecture n'est pas indispensable à la compréhension des travaux.

- l'article "Time reduction of the dynamic programming computation in the case of a hybrid vehicle" annexe F.4, apporte quelques précisions sur la partie concernant le développement de la programmation dynamique pour les véhicules hybrides et les gains de temps obtenus en travaillant sur l'algorithmique du problème (§3.3).
- l'article "Optimal Energy Management of HEVs with Hybrid Storage System" annexe F.6 présente en détail l'application du principe du maximum de Pontryagin à une architecture hybride parallèle avec une source réversible elle même hybride (3.4.2). Des méthodes à base de règles sont également développées, et comparées à la gestion optimale.

3.1. Introduction

Comme dans tout système alimenté par plusieurs sources d'énergie, des lois de gestion sont indispensables dans les véhicules hybrides [50, 51]. Elles permettent de choisir les flux de puissance et d'énergie dans le véhicule et doivent respecter des contraintes de charge ou décharge de la batterie (cf §1.3).

Ces lois pourront être classées en deux types : des lois "en ligne" qui sont ou peuvent être directement implémentées dans un calculateur véhicule et des lois "hors ligne" qui nécessitent le plus souvent de connaître exactement le cycle d'usage à l'avance et ne peuvent donc être utilisées directement en ligne.

Dans les lois "en-ligne", on retrouvera généralement des méthodes à base de simples règles de gestion (§3.2), [28, 52 – 57] parfois optimisées hors ligne [58 – 60] ou des lois bien plus complexes issues de résultats de "pré-calcul" hors ligne. Dans ce cas, on peut retrouver des lois sous forme d'abaques, déterminées à partir de processus d'optimisation de type programmation dynamique stochastique, par exemple [61 – 63], des lois basées sur la logique floue [10, 64 – 66] ou des lois de type "equivalent consumption management strategy" (ECMS) [67 – 70] très proche de lois hors ligne basées sur le Principe du Maximum de Pontryagin (§3.4). A noter que ces lois peuvent dans une certaine mesure tenir compte de "prédiction" sur les futures conditions d'utilisation du véhicule [71, 72].

Dans les méthodes utilisées hors ligne, soit pour "valider" les lois "en-ligne", soit pour faire du pré-dimensionnement, on retrouve majoritairement des méthodes basées sur la commande optimale des systèmes [73]. En particulier, on retrouve la programmation dynamique ($\S3.3$), [21, 57, 74 - 80] et le Principe du Maximum de Pontryagin [81 - 84]. D'autres méthodes d'optimisation combinatoire sont parfois utilisées (type branch and bound), [85].

On retrouve aussi plus rarement des méthodes basées sur l'optimisation quadratique [86 - 89] ou stochastique [90], peu utilisées car ne garantissant pas l'optimal de la solution.

Si la programmation dynamique est la seule garantissant la convergence (à la discrétisation près) et est donc la plus utilisée pour traiter la gestion de l'énergie de systèmes à deux sources d'énergie, moteur et réservoir(MT)/batterie(BATT) ou batterie/supercapacité(SC) [91, 92], elle devient prohibitive en temps de calcul et ressources logiciels dans les cas où l'on a plusieurs variables d'états. On lui préferera alors souvent le PMP par exemple pour les systèmes multi-sources MT/BATT /SC [93] ou PAC/BATT/SC, [94], ou alors on ne traitera qu'une seule variable d'état par DP [57, 94]

Un autre exemple complexe de gestion d'énergie est celui du compromis consommation/pollution. On retrouve alors deux variables d'état à traiter (l'état de charge du système de stockage et par exemple la température du pot catalytique). Ce problème peut lui aussi être résolu par des méthodes à base de règles [95] en utilisant des méthodes type PMP-EMS [96 - 99] voire en tentant d'utiliser la programmation dynamique déterministe [100] ou stochastique [101] pour résoudre tout ou partie du problème.

Au niveau méthodes de gestion de l'énergie, mes travaux se sont majoritairement focalisés sur la programmation dynamique en travaillant notamment sur la partie algorithmique (§3.3) pour réduire les temps de calcul et pouvoir utiliser cette méthode dans des processus de dimensionnement. Des travaux ont également été entrepris sur le PMP notamment pour les cas où plusieurs variables d'état interviennent (§3.4).

Dans ce chapitre, nous présentons dans un premier temps des lois de gestions à base de règles classiquement utilisées ou pouvant être utilisées à bord des véhicules hybrides ($\S3.2$). Nous présentons ensuite nos travaux sur les méthodes de gestion optimale de l'énergie des véhicules hybrides.

3.2. Gestion à base de règles

Ces lois de gestion [51] sont, en général, des règles plus ou moins simples permettant, en fonction de paramètres véhicules (vitesse, accélération, SoC ...), de choisir à chaque instant un mode de fonctionnement du véhicule tout en visant un état de charge préférentiel.

La figure 3.1 présente le principe de loi de gestion à base de règles simples utilisées par exemple dans la Toyota PRIUS-II. La figure ne présente pas tous les cas où des limitations entrent en cause, pour cela voir annexe F.1.

Globalement, ces lois de gestion se basent sur deux abaques pour faire le choix du mode électrique ou hybride. Une puissance totale demandée est calculée à partir de la vitesse des roues et du couple demandé (appui sur la pédale d'accélérateur). On ajoute une puissance demandée par la batterie fonction de son état de charge, et on compare cette puissance à une abaque elle même fonction de l'état de charge de la batterie. Si le choix d'un mode hybride a été fait, on estime les pertes qui auront lieu dans le système pour déterminer la puissance que devra fournir le moteur thermique et on choisit son point de fonctionnement sur une courbe (couple-vitesse) déterminée à l'avance.



FIGURE 3.1. Gestion à base de régles

La puissance demandée par la batterie étant négative ou positive selon son état de charge (SoC), ces lois ont naturellement tendance à ramener la batterie à un état de charge cible correspondant à une puissance demandée nulle. Cependant, pendant les simulations (ou les mesures) on ne garantit pas un bilan batterie nul sur un cycle ($\Delta SoC = SoC_{finale} - SoC_{initial} = 0$). Pour cela, en simulation notamment, nous pouvons agir sur l'état de charge initial jusqu'à garantir un bilan batterie nul. On utilisera par exemple une méthode de type dichotomie. On peut aussi réaliser plusieurs simulations ou mesures avec des états de charge initiaux différents puis, par des méthodes de régression linéaire, calculer une consommation à ΔSoC nul.

L'article annexe F.1 présente des résultats comparatifs entre mesure et simulation et notamment la comparaison des vitesses et couples du moteur thermique et SoC qui sont représentatifs des choix faits au niveau de la gestion de l'énergie. On retrouve une très bonne corrélation simulations/mesures ce qui valide les lois de gestion que nous avons implémentées.

Des lois basées sur les mêmes principes ont également été proposées et comparées à des méthodes optimales (PMP) dans le cas où la source de stockage est elle-même hybride et gérée par des règles basées sur la fréquence de la puissance demandée à la batterie (voir article annexe F.6).

Ces lois de gestion à base de règles présentent cependant plusieurs inconvénients. Etant empiriques, on connaît difficilement leur efficacité ; de meilleures lois permettraient-elles de consommer moins ? Elles peuvent être efficaces pour une architecture ou un dimensionnement et pas un autre. Enfin, elle ne garantissent pas facilement un bilan batterie nul. Le développement de méthodes calculant des lois de gestion de l'énergie optimales devient donc indispensable pour se créer un référentiel et comparer objectivement différentes architectures ou dimensionnements (§4). Pour cela, deux grands principes sont souvent utilisés, la Programmation Dynamique (DP) et le Principe du Maximum de Pontryagin (PMP).

3.3. Programmation Dynamique

Le principe de la programmation dynamique consiste à trouver la meilleure trajectoire d'une variable d'état d'un système qui minimise un objectif donné dans un espace borné. Pour cela, l'espace de recherche est discrétisé et l'on applique des méthodes récursives de recherche basées sur le principe d'optimalité de Bellman [73, 102, 103].

Dans le cas des véhicules hybrides, la variable d'état est l'état de charge de la batterie (fig 3.2). L'espace est borné par des états de charge max et min de la batterie (SoC max et SoC min), et des limites de charge et décharge max de la batterie. L'objectif à minimiser est la consommation sur un cycle, le coût des arcs est donc un débit de carburant.

Dans la façon de décrire le problème, nous prenons comme limite de décharge maximale le mode tout électrique, et comme limite de recharge maximale le mode hybride avec moteur thermique au maximum de couple (de puissance) possible. Nous accordons une attention particulière à ce que les arcs correspondants au mode tout électrique soient effectivement présents dans le "graphe" (voir article annexe F.4). La plupart des applications utilisent un maillage régulier en SoC. Les arcs "tout électrique" ne sont donc pas exactement présents dans l'espace discrétisé, et l'arc le plus proche est considéré comme tout électrique. Cela peut provoquer des erreurs conséquentes sur l'état de charge final et sur la consommation, surtout si la discrétisation devient "grossière", ce qui est souvent le cas dans des processus de dimensionnement. Nous construisons le domaine de façon à ce que les limites se recoupent à un état de charge final souhaité (pas obligatoirement égal à l'état de charge initial), cela nous permet de garantir à coup sûr la contrainte sur le SoC final.



FIGURE 3.2. principe programmation dynamique

Par ailleurs, un travail important a été réalisé niveau algorithmique pour résoudre le problème de la façon la plus efficace possible, les temps de résolution pour une discrétisation de 1s en temps et 0.05 % en SoC sont alors de l'ordre de la seconde ou de quelques secondes (voir annexe F.4). On peut alors envisager d'utiliser la programmation dynamique dans des processus de dimensionnement (voir chapitre 4).

Nous avons par ailleurs essayé au maximum de séparer la partie résolution du problème de la partie "modèle" physique de façon à faciliter l'implantation de nouvelles architectures. L'outil développé présente donc le "schéma" de la figure 3.3.



FIGURE 3.3. Structure outils de programmation dynamique

Il faut donc dans un premier temps, calculer les courants min et max correspondant aux charges/décharges maximales de la batterie. Un graphe ne contenant que des informations "géométriques" (indices des limites et des arcs) est alors construit. Le calcul du coût des arcs est ensuite réalisé en amont de la résolution et après détermination du domaine d'étude. Il suffit pour cela de calculer la consommation du véhicule avec un modèle inverse pour une sollicitation véhicule donnée (vitesse, accélération) et un courant batterie donné (lié au δSoC). Si une optimisation "locale" est nécessaire ; choix d'un mode hybride (série ou parallèle, choix d'un rapport de boite de vitesses, choix du point de fonctionnement du moteur thermique ...) elle est réalisée à ce stade sur chaque arc. A noter que les dynamiques de changement de mode ou de rapport de boîte de vitesses sont donc ignorées. Nous faisons généralement l'hypothèse que les paramètres de la batterie sont indépendants de son état de charge, ce qui reste assez vrai dans le domaine d'étude pour les véhicules hybrides non rechargeables. Cela nous permet de ne calculer les coûts des arcs que pour un point à un instant t et de les reporter pour tous les points dans l'axe y. Cette hypothèse n'est plus valable si l'on a des applications avec des super-capacités où la tension à vide est évidemment dépendante de l'état de charge, le temps de calcul des coûts s'en trouve alors fortement augmenté (matrice des coûts 3D (δSoC , temps, SoC).

Grâce à ces développements, nous avons facilement inséré de nouvelles architectures dans la bibliothèque VEHLIB. Un nombre important d'architectures de véhicules hybrides ont ainsi été implémentées avec des modèles inverses et les lois de gestions associées dans le logiciel. Nous avons modélisé des architectures hybrides parallèles [104], des architectures à dérivation de puissance [21, 46, 78] et des architectures de type série-parallèles [30, 45]. Nous avons également appliqué la programmation dynamique à la gestion de véhicules électriques avec stockage de l'énergie hybride (batterie/super-capacité) [91].

3.4. Principe du Maximum de Pontryagin

Même si la programmation dynamique présente l'avantage de s'appliquer et de converger facilement pour toutes les architectures et usages (cycles d'utilisation), il peut être utile de développer aussi le Principe du Maximum de Pontryagin [73, 81, 84] sur certaines architectures. En effet, cette méthode peut être adaptée pour des commandes "en ligne" en devenant sous-optimale [67 – 71], et peut être utile pour les problèmes où plusieurs variables d'état interviennent. Dans ce dernier cas, la programmation dynamique devient souvent prohibitive en ressources logiciels (mémoire et temps de calcul).

3.4.1. Principe

Pour un système défini par une équation d'état :

$$\dot{x}(t) = \frac{dx(t)}{dt} = a(x(t), u(t), t)$$
(3.1)

Avec une fonctionnelle J à minimiser :

$$J(u) = \int_{t_0}^{t_f} g(x(t), u(t), t) dt$$
(3.2)

où x(t) est le vecteur d'état et u(t) le vecteur des variables de contrôle. Si l'on impose une contrainte sur l'état final, le PMP [73] stipule que, étant donné la fonctionnelle augmentée H, également appelée Hamiltonien:

$$H(x(t), u(t), t) =$$

$$g(x(t), u(t), t) + p^{t}(t) \cdot a(x(t), u(t), t)$$
(3.3)

les conditions nécessaires pour que u^* soit le contrôle optimal sont :

(i)
$$\dot{x}(t) = \frac{\partial H(x(t), u^*(t), p(t), t)}{\partial p}$$
 (3.4)

$$(ii) \ \dot{p}(t) = -\frac{\partial H(x(t), u^*(t), p(t), t)}{\partial x}$$

$$(3.5)$$

à chaque pas de temps et pour chaque contrôle admissible u(t)

(*iii*)
$$H(x(t), u^*(t), p(t), t) \le H(x(t), u(t), p(t), t)$$
 (3.6)

Avec p(t) communément appelé multiplicateur de Lagrange et qui sera déterminé de façon à respecter les contraintes du système, $p^t(t)$ est la transposée p(t).

A noter que le contrôle trouvé en minimisant H à chaque pas de temps ne reste optimal que s'il n'y a pas saturation de l'état du système.

3.4.2. Application aux véhicules hybrides

Dans le cas des véhicules hybrides, on peut choisir comme état du système l'énergie stockée dans la batterie E_{0batt} , et une fonctionnelle à minimiser qui est la consommation de carburant sur un cycle (intégrale du débit de carburant d_{carb}), avec comme contrainte un état de charge final de la batterie. Le PMP, appliqué aux véhicules hybrides, consiste alors à minimiser à chaque pas de temps une quantité appelée Hamiltonien qui fait intervenir la consommation de carburant et la puissance de la source parfaite de la batterie. Cette quantité fait intervenir un multiplicateur de Lagrange dont la valeur permettra de contrôler l'état de charge final de la batterie. Dans notre cas et selon l'équation 3.6, en faisant l'hypothèse que les paramètres batterie sont indépendants du SoC, le multiplicateur de Lagrange p(t) sera en fait constant et noté λ . Le Hamiltonien peut alors par exemple être écrit en fonction du courant batterie I_{batt} :

$$\Rightarrow \begin{cases} (i) \ H = d_{carb}(I_{batt}) + \lambda \cdot E_{0batt} \cdot I_{batt} \quad pour \quad I_{batt} \neq I_{battelec} \\ (ii) \ H = \lambda \cdot E_{0battelec} \cdot I_{battelec} \quad pour \quad I_{batt} = I_{battelec} \end{cases}$$
(3.7)

Dans le cas des véhicules hybrides, dû à la discontinuité du fonctionnement du moteur thermique selon que l'on est en mode électrique ou hybride, le Hamiltonien est aussi discontinu pour un courant batterie correspondant au courant batterie en mode électrique $I_{battelec}$.

Trouver le contrôle optimal, sous réserve de ne pas saturer l'état de charge de la batterie, revient donc à chaque pas de temps à trouver le minimum de la fonction décrite eq.3.7(i) et du point eq.3.7(ii).

La figure 3.4 représente par exemple la fonction Hamiltonien pour une architecture hybride parallèle aux instants 150s et 850s d'un cycle NEDC pour différentes valeurs de λ . On voit que, par exemple à l'instant t=150s (fig.3.6) on ferait avec $\lambda = 1$ à 3 le choix d'un mode électrique et avec $\lambda = 4$ le choix d'un mode hybride avec $I_{batt} = -100A$ (recharge batterie). A l'instant t=850s du cycle on choisira un mode électrique pour $\lambda = 1$ et 2 et un mode hybride pour $\lambda = 3$ et 4 avec des courants batterie de recharge de -83A et -60A.



FIGURE 3.4. Hamiltonien sur cycle NEDC

On voit sur ces courbes que plus lambda est grand, plus on favorise le mode hybride. La figure 3.5 montre l'évolution du SoC batterie en fonction du temps sur le cycle NEDC pour des valeurs de lambda augmentant. On voit que pour des lambdas croissants, des sauts apparaissent dans cette évolution. Cela se confirme figure 3.6, qui représente l'état de charge final en fonction de λ . Ces sauts correspondent aux paliers du cycle NEDC (fig. 3.6). En effet, sur ces paliers, il existe une valeur de λ qui fait passer tous les points de ces paliers du mode électrique au mode hybride et donc provoque un gros changement sur l'état de charge final de la batterie.

La "difficulté" de cette méthode réside donc dans la recherche du ou des multiplicateurs de Lagrange qui nous donnent l'état de charge désiré. Si l'on a une seule variable d'état, donc un seul multiplicateur de Lagrange, cela peut aisément se faire par exemple par dichotomie, cela est moins évident pour les problèmes à plusieurs variables d'état [93, 98]. Si l'on est dans le cas où l'on a un saut sur un palier, une fois trouvée la valeur de λ qui provoque le "saut", on pourra, en post-traitement, faire basculer le nombre de points nécessaires du mode électrique au mode hybride pour respecter le SoC final désiré.



FIGURE 3.5. Evolution du SoC pour λ augmentant



FIGURE 3.6. Evolution du SoC final en fonction de λ

On peut aussi profiter de la discontinuité du Hamiltonien pour pré-calculer les valeurs de λ qui feront basculer un certain nombre de points du mode électrique au mode hybride et calculer pour tous ces multiplicateurs de Lagrange, l'évolution du SOC, et en déterminer ainsi aisément le λ désiré. Cette méthode a été présentée par S. Delprat et T. Hofman dans [84], nous l'avons testée avec des gains de temps conséquents sur la résolution du problème.

3.4.3. Travaux

Nous avons développé cette méthode notamment sur des architectures hybrides parallèles et avons validé les résultats par comparaison avec la programmation dynamique (fig. 3.7). Ce cas ne présentant pas de saturation de l'état de charge, la Programmation dynamique et le Principe du Maximum de Pontryagin sont bien sûr parfaitement équivalents [105].



FIGURE 3.7. Comparaison PMP - DP

Nous avons, pour une architecture hybride parallèle, développé cette méthode dans le cas où la source de stockage est également hybride (Batterie plus Super-capacités). Nous avons ainsi pu comparer des méthodes de gestion de l'énergie optimale à des méthodes à base de règles telles que celles présentées paragraphe 3.2. En se fixant un objectif pondéré consommation/courant efficace batterie, nous avons également pu comparer des stratégies optimales ou à base de règle en termes de sollicitations batterie (voir article annexe F.6).

Nous avons également commencé (avec B. Jeanneret de l'équipe VEH) des travaux sur l'étude du compromis consommation/pollution [98]. Nous avons alors une fonctionnelle à minimiser faisant intervenir la consommation et les émissions de polluants (avec une pondération entre les deux) et des variables d'état qui sont l'énergie stockée dans la batterie et la température du pot catalytique. Ces travaux se poursuivent actuellement dans l'équipe avec une thèse encadrée par B. Jeanneret.

3.5. Conclusion et perspectives

Mes travaux sur la gestion d'énergie ont, dans un premier temps, porté sur le développement de modules de programmation dynamique puis le développement des modèles d'un nombre important d'architectures hybrides (parfois en collaboration avec des stagiaires ou CDD). Ils ont ensuite porté sur le développement du Principe du Maximum de Pontryagin. Ces développements sur le PMP se poursuivront notamment en continuant les travaux sur l'application de nouvelles méthodes de formulation et de résolution du problème (pré-calcul des multiplicateurs de Lagrange) et aussi en appliquant ce principe à d'autres architectures que les architectures hybrides parallèles (série-parallèle et dérivation de puissance).

CHAPITRE 4

Le dimensionnement des VEH

Contenu

4.1. Introduction	54
4.2. Et at de l'art sur les méthodes de dimensionnement des VEH .	54
4.2.1 Formulation du problème	54
4.2.2 Couplage dimensionnement/gestion de l'énergie $\ldots \ldots \ldots \ldots$	55
4.3. Travaux sur le dimensionnement	58
4.3.1 Études paramétriques	58
4.3.2 Travaux sur les méthodes pour résoudre le couplage dimensionne- ment/gestion	60
4.3.3 Comparaison d'architectures	62
4.3.4 Pré-dimensionnement des machines électriques	65
$4.3.5 \text{M\acute{e}thodes de dimensionnement multi-niveaux topologie/système/ges-}$	
$ ext{tion}$	69
4.4. Conclusion et perspectives	69

<u>Préambule</u> : Ce chapitre se réfère à l'article "Comparison of different power-split hybrid architectures using a global optimisation method" dont un résumé est présenté annexe F.5. Il apporte quelques précisions sur la partie concernant la comparaison d'architectures hybrides de type dérivation de puissance notamment (§4.3.3).

4.1. Introduction

Après le développement de modèles de composants et de véhicules, nous nous sommes intéressés au dimensionnement des chaînes de traction hybrides et de leurs composants. Comme présentés chapitre 1, les véhicules hybrides sont des systèmes complexes où existent de fortes interactions entre dimensionnement, gestion de l'énergie, usage et choix de l'architecture (topologie).

Nous présentons dans ce chapitre les méthodes mises en place lors de différents travaux pour apporter des réponses à cette problématique. Nous reviendrons dans un premier temps sur la formulation du problème d'optimisation, puis sur les méthodes permettant de résoudre le problème du couplage dimensionnement-gestion d'énergie en présentant des exemples issus de travaux en grande partie réalisés lors de thèses ou de CDD. Enfin, nous présenterons brièvement les développements récents et les travaux en cours pour répondre au problème du choix de l'architecture.

4.2. Etat de l'art sur les méthodes de dimensionnement des VEH

4.2.1. Formulation du problème

Le dimensionnement d'un véhicule peut être formulé comme un problème d'optimisation le plus souvent multi-objectifs. On retrouvera donc, comme dans la majorité des problèmes d'optimisation :

- Un ou plusieurs objectifs dont par exemple :
 - → la consommation sur un cycle d'usage, qui dans notre cas dépendra bien sûr de la gestion de l'énergie.
 - → le volume (représentatif de l'énergie) de la batterie. Cette grandeur est représentative du taux d'hybridation et est une grandeur très sensible sur la consommation du véhicule (§5.1.1), et sur le coût du système. Elle sera également un paramètre important dans le vieillissement du pack batterie.
 - \rightarrow d'autres objectifs; volumes des composants [33, 46], coût [106], complexité ...
- Plusieurs contraintes, au niveau système et composants (dimensions, tension de bus ...) :
 On retrouvera notamment dans les véhicules des contraintes de performances maximum du véhicule telles que :
 - → le temps mis par le véhicule pour accélérer de 0 à 100 $km \cdot h^{-1}$: t_{0-100} .
 - → le temps mis par le véhicule pour accélérer de 80 à 120 $km \cdot h^{-1}$: t_{80-120} .

- → le temps mis par le véhicule pour dépasser un camion roulant à 80 $km \cdot h^{-1}$: t_{dep} .
- \rightarrow la vitesse maximale du véhicule : V_{max} .
- → la vitesse maximale du véhicule sur une pente à 5% : $V_{max5\%}$.

Et dans un véhicule hybride une ou des contraintes sur la ou les sources de stockage réversible tel que :

→ l'état de charge final ou la différence de SoC entre le début et la fin du cycle $\Delta SOC = SoC_{fin} - SoC_{ini}$.

4.2.2. Couplage dimensionnement/gestion de l'énergie

Pour répondre au problème d'optimisation multi-niveaux dimensionnement/gestion-énergie, différentes approches sont possibles [23, 107]. On retrouve classiquement les types d'approches suivantes :

- les <u>approches séquentielles</u>. On traite en général d'abord le problème de dimensionnement puis celui de la gestion d'énergie. Ces approches seront forcément sous optimales.
- les <u>approches alternées</u> [108]. Le dimensionnement et la gestion énergétique sont optimisés de manière distincte et successive dans un processus itératif. A partir d'un dimensionnement initial fixé, la gestion de l'énergie est optimisée : par exemple on peut minimiser la consommation de carburant pour une mission. On modifie ensuite le dimensionnement en se basant sur la gestion énergétique trouvée à l'étape précédente. Puis, une nouvelle itération a lieu jusqu'à convergence du processus. Si les méthodes de gestion d'énergie sont trop coûteuses en temps de calcul, cela peut permettre de limiter le nombre d'appels à l'algorithme de gestion. Néanmoins, tout comme l'approche séquentielle, cette méthode ne garantit pas l'optimalité du système complet.
- les <u>approches imbriquées</u> qui sont nettement les plus utilisées dans la littérature [109 114]. De telles approches, que l'on peut aussi qualifier de multi-niveaux, traitent le dimensionnement à un niveau "supérieur" et la gestion de l'énergie est à un niveau inférieur imbriquée dans le processus de dimensionnement (fig.4.1).Pour chacun des dimensionnements proposés au niveau supérieur, on résout le problème de gestion énergétique du véhicule (à dimensionnement fixé). En fonction des résultats obtenus (consommation de chaque dimensionnement par exemple), de nouveaux dimensionnements sont proposés par le niveau optimisation.
- les <u>approches simultanées</u> qui mettent sur le même plan les variables de dimensionnement et de gestion énergétique (fig.4.1). Les variables d'optimisation du système et de la gestion sont traitées au même niveau par un seul et même algorithme. Cela peut rendre le problème global complexe à formuler et à résoudre (grand nombre de contraintes et de variables, qui peuvent être de nature différente, etc.). On peut se référer à [86 88, 115]. On peut alors travailler la formulation du problème pour le rendre complètement analytique [116] ou complètement discret [85].



FIGURE 4.1. processus de dimensionnement optimal d'un VEH

En plus du choix de la méthode de résolution, plusieurs questions vont se poser sur les modèles utilisés au niveau composants, système et gestion de l'énergie :

- Parmi les méthodes de gestion de l'énergie, on pourra faire un choix de méthodes optimales (§3.3 et 3.4) ou à base de règles (§3.2). Des lois de gestion à base de règles ont l'inconvénient d'introduire un biais dans le processus de dimensionnement car elles peuvent être efficaces pour un dimensionnement et pas pour un autre, de plus, le respect de la contrainte sur l'état de charge de la batterie peut être complexe et long à réaliser (§3.4). Elles présentent, par contre, l'avantage de pouvoir être implémentées directement dans un calculateur à bord du véhicule. Une solution pouvant, en partie, gommer cet inconvénient peut être de paramétrer ces lois de gestions et d'optimiser ces paramètres de gestion dans le processus de dimensionnement (approche simultanée) [61, 110, 117]. Des lois optimales permettront une comparaison objective des dimensionnements mais on devra dériver de ces lois des règles ou méthodes implémentables dans l'intelligence de bord, donc on s'éloignera de l'optimal trouvé. Là aussi des méthodes dérivées de lois optimales basées sur le PMP peuvent permettre de répondre en partie à ce problème. On notera les travaux de M. Poline [57] qui présente une comparaison avec une approche imbriquée entre des lois optimales (DP) ou à base de règles.
- Plusieurs niveaux de modélisation des composants pourront être utilisés. Dans la majeure partie des approches, on utilise plutôt des composants de type "méta-modèles". Il s'agit en général de modèles analytiques qui ne font plus directement intervenir les dimensions des composants et qui tentent de représenter leurs comportements avec des modèles rapides et suffisamment précis pour être utilisés dans des processus d'optimisation. On retrouve à ce niveau des modèles de type cartographie pour les moteurs thermiques et machines électriques, des modèles utilisant des coefficients aérodynamiques ou des lois de route au niveau véhicule, ou des modèles simples de réducteur (rapport de réduction rendement). Si dans certains cas, ces modèles permettent de remonter facilement aux dimensions des composants, il est, en général, assez compliqué de passer

des paramètres d'optimisation à la réalisation des composants (ME, MT véhicule). Par ailleurs, il peut aussi exister un couplage entre les performances des composants (zone de rendement, vitesse de base, forme de la courbe de couple max ...), la gestion de l'énergie et le dimensionnement des autres composants (§1.5). Ce couplage sera très compliqué à prendre en compte avec des méta-modèles. Pour répondre à ce problème on peut, par exemple, utiliser des modèles "dimensionnants" de composants. A cette fin, on utilisera, soit des modèles analytiques faisant intervenir les dimensions des composants ([116, 118]), soit des modèles dits semi-analytiques par exemple à base de réseau de réluctances ou de résistances thermique. On utilisera ces modèles directement ou en repassant par un niveau "méta-modèle" (fig.4.1). C'est le choix que nous avons fait dans les thèses de V. Reinbold et M. Le-Guyadec afin de réaliser un pré-dimensionnement des machines électriques en même temps que le dimensionnement du système et de la gestion.

• Enfin, on peut aussi s'interroger sur la modélisation du système lui-même. On retrouve dans une très grande majorité des cas un modèle composé des sous-modèles de composants mais on peut aussi à ce niveau, développer un méta-modèle du système complet (éventuellement avec la gestion d'énergie) et optimiser ce modèle. Cela peut être particulièrement utile quand les modèles sont très gourmands en temps de calcul, soit parce que très complexes, soit parce que on a gardé un niveau de finesse élevé. On retrouve par exemple des méthodes à base de plans d'expérience [119] ou d'approximation par des fonctions analytiques [116].

Quelle que soit la manière de résoudre le problème du couplage dimensionnement/gestion-énergie, plusieurs choix peuvent être faits au niveau de la méthode d'optimisation ou de la recherche du minimum. On pourra parfois se contenter de "simples" études paramétriques ([46, 59, 60],[120]) mais le nombre de variables obligera généralement à utiliser des méthodes plus complexes. On citera par exemple, les méthodes de type méta-heuristique et notamment les algorithmes génétiques très fréquemment utilisés [89, 109, 113, 121], les méthodes à base de gradients et notamment l'algorithme SQP [87, 114], ou les méthodes issues de la recherche opérationnelle plus rarement utilisées [85, 122]. On pourra aussi coupler ces méthodes, par exemple pour rechercher un minimum "global" avec des méthodes type plan d'expérience puis affiner cette recherche avec des méthodes à base de gradients [111].

En dernier lieu, le problème du choix de l'architecture se pose. Là aussi, de forts couplages existent entre l'architecture, le dimensionnement, la gestion d'énergie et le dimensionnement des composants. Plusieurs équipes et laboratoires se sont lancés, ces dernières années, sur ce sujet, soit en se basant sur une architecture "générale" à base de trains épicycloïdaux et de multiples embrayages permettant de balayer un grand nombre de connexions possibles [123 - 125], soit en générant par optimisation combinatoire toutes les architectures possibles à partir de certains composants donnés [24, 126].

Le "concepteur" de véhicule hybride sera donc confronté à plusieurs choix : finesse-précision des modèles, méthodes de gestion de l'énergie, méthodes d'optimisation pour une architecture choisie et au delà choix de l'architecture. Dans la littérature, on retrouve souvent l'utilisation de méthodes métaheuristiques (GA nomment) liées à une gestion d'énergie optimale par programmation dynamique et des modèles composants de type "méta-modèle". Ce triptyque permet effectivement d'utiliser une méthode d'optimisation globale susceptible de s'affranchir de minimas locaux, de résoudre des problèmes avec des variables discrètes et des modèles discontinus (choix des modes électrique ou hybride notamment), de faire une comparaison objective en termes de consommation (minimum atteignable) et d'avoir un nombre restreint de variables d'optimisation dû à l'utilisation de méta-modèles des composants.

Nous présenterons dans la suite de ce chapitre nos travaux sur ces méthodes de dimensionnement et leurs applications sur certains exemples. Dans la partie 4.3 nous présenterons quelques exemples de dimensionnement et de comparaisons d'architectures hybrides (4.3.1 et 4.3.3) ainsi que les travaux sur la méthodologie (§4.3.2) et la prise en compte du pré-dimensionnement des machines électriques dans le processus d'optimisation (§4.3.4). En dernier lieu, nous présenterons les travaux récents sur l'ajout de la dimension "topologie" au problème de dimensionnement qui revêt alors trois niveaux topologie/système/gestion (§4.3.5).

4.3. Travaux sur le dimensionnement

Dans un premier temps, nous avons utilisé des modèles simples des composants de type cartographie en appliquant un coefficient d'homothétie aux moteurs thermiques et électriques §4.3.1 et §4.3.3) et en faisant varier les rapports de démultiplication des boîtes de vitesse, réducteurs et coupleurs. Le coefficient d'homothétie s'applique (fig 4.2) à la caractéristique couple-max/vitesse et à la cartographie de pertes ou de consommation. Les masses sont, elles aussi, multipliées par ce coefficient, l'inertie par $k^{5/3}$ ce qui correspond à l'augmentation de l'inertie d'un cylindre dont les dimensions augmenteraient de k/3. Dans un second temps, nous avons, lors des thèses de V. Reinbold et M. Le-Guyadec développé des modèles dimensionnants des machines électriques et utilisé ces modèles dans le processus de dimensionnement §4.3.4.



FIGURE 4.2. facteurs d'échelles

Nous avons majoritairement choisi d'utiliser, lors de ces études, la programmation dynamique comme loi de gestion de l'énergie, de façon à opérer une comparaison objective entre les différentes architectures et dimensionnements et parce que nous avions un outil (§3.3) développé et "éprouvé" pour un grand nombre de modèles d'architectures hybrides. Nous avons aussi exploré d'autres pistes au niveau de la gestion d'énergie(cf. §4.3.2).

Ces travaux ont débuté par de simples études paramétriques ($\S4.3.1$), puis après une phase d'étude méthodologique, ($\S4.3.2$) utilisent majoritairement un couplage algorithme génétique/programmation dy-namique ($\S4.3.3$ et $\S4.3.4$).

4.3.1. Études paramétriques

Les travaux sur le dimensionnement des systèmes hybrides ont débuté lors du stage de Sylvain Perez [127] en comparant différentes architectures, dimensionnées à l'aide d'études paramétriques sur la taille des packs batterie notamment. Ces premières études ont donc montré des potentiels de gain par rapport à un véhicule conventionnel de 15 à 40% (selon les architectures) sur cycle urbain avec des gains diminuant au fur et à mesure que on va vers les cycles autoroutiers.

Ce type de méthode a également été utilisé lors des travaux de Romain Derollepot dans les projets VELECTA et PROMOVAN : lors du projet VELECTA pour le dimensionnement d'un système de stockage hybride pour véhicule électrique [128] et lors du projet PROMOVAN pour dimensionner et comparer des architectures hybrides complexes dédiées à des embarcations fluviales (fig. 4.3) [29]. Dans ce projet, nous utilisons également une loi de gestion de l'énergie optimale spécialement développée pour ces architectures complexes (§3.3) [30, 129]. Des cycles d'usage spécifiques ont été au préalable développés grâce à une campagne de mesure préliminaire (§2.4.2).

Les contraintes technologiques (réducteurs disponibles dans le domaine du fluvial par exemple) et opérationnelles (puissance maximale disponible pendant un temps minimal) sont telles que seuls deux paramètres (par exemple les puissances des moteurs principaux P_{MT} et du groupe électrogène P_{GE}) suffisent pour fixer les puissances et tailles des composants. La figure 4.4 montre les consommations d'embarcations de type pousseur pour différentes valeurs de ces puissances. Un optimum est clairement obtenu pour des puissances des moteurs principaux autour de 500 kW. Cette méthode à également permis de comparer différentes architectures : parallèle sans modification des moteurs principaux (hybridation minimaliste), série et série-parallèle. Les gains par rapport à l'architecture conventionnelle existante sont indiqués dans le tableau 4.1 et vont jusqu'à 12 %. Une architecture série-parallèle avec des moteurs de 375 kW, pourrait présenter des gains de l'ordre de 10 %, à mettre en regard d'une consommation annuelle de 400 000 l/ana. Ce type de moteur rejoint les standards de motorisation routière (camion), et est donc produit en grande série et "dépollué",



FIGURE 4.3. Hybride série parallèle pour embarcations fluviales



FIGURE 4.4. Consommation hybride série parallèle

Tableau 4.1. Architectures sélectionnées
--

		ICE	EM	EG	BATT	fuel	gain
	architecture	kW	kW	kW	Tonnes	l/h	%
	Conventionnal	2*950				156,9	0
	Parallel	2*950	2*125		0,4	145,8	7
	Series-Parallel	2*500	2*450	1*375	1,7	137,5	12
IV	Series-Parallel	2*375	2*575	1*375	3	140,8	10
V	Series		2*950	2*500	4,4	157	0

Ces études paramétriques peuvent rapidement trouver et prouver leurs limites (voir début de paragraphe) et il est souvent nécessaire de prendre en compte un nombre plus important de paramètres de dimensionnement (même en restant à un niveau système). Il devient alors nécessaire de faire appel à des algorithmes d'optimisation.

4.3.2. Travaux sur les méthodes pour résoudre le couplage dimensionnement/gestion

Lorsque le nombre de variables d'optimisation augmente, les études paramétriques deviennent prohibitives en temps de calcul et il devient utile, voire indispensable, de faire appel à des méthodes d'optimisation pour réaliser le dimensionnement ou le pré-dimensionnement des systèmes et des composants. Dans notre cas, on doit alors traiter le problème du couplage gestion de l'énergie/dimensionnement (§4.2.2) et faire un choix des méthodes les mieux adaptées à notre problématique.

Lors du stage puis de la thèse de Vincent Reinbold, nous avons notamment testé les méthodes suivantes :

• Méthode imbriquée plan d'expérience avec RBF (Radial Basis Fonction) et programmation dynamique pour la gestion de l'énergie [130, 131]. Cette méthode a été testée avant les travaux réalisés sur la programmation dynamique qui ont grandement diminué les temps de calcul. La fonction objectif (consommation) étant très coûteuse en temps de calcul une méthode type plan d'expérience semblait être une bonne solution.

- Méthode imbriquée algorithme génétique (dimensionnement) et programmation dynamique [46, 132]. La programmation dynamique semble la méthode de gestion de l'énergie optimale la plus robuste pour le cas des véhicules hybrides. Coupler cette méthode à un algorithme génétique permet d'obtenir une méthode d'optimisation globale (recherche dans tout le domaine des solutions), multi-objectifs, et qui s'adapte facilement à des problèmes non-continus ou non dérivables. Les discontinuités induites par la programmation dynamique, par le choix des modes électriques hybrides, et par le choix des rapports de boîte de vitesses sont alors facilement "résolues". Nous avons également étudié le cas du nombre de paires de pôles de la machine électrique (§4.3.4).
- Méthode couplée d'optimisation conjointe des paramètres système et des variables de gestion de l'énergie en utilisant un algorithme de type SQP ([87]). Pour tenter d'accélérer le processus, des méthodes de type SQP ont également été essayées en mettant sur le même plan les variables de dimensionnement du système et de la gestion d'énergie. A noter que dans nos essais, les variables discrètes sur le choix des modes électriques-hybrides étaient par contre fixées une fois pour toutes sur un dimensionnement "moyen" de façon à rendre le problème dérivable et calculer les dérivées des fonctions objectifs et des contraintes de façon analytique [33].

Le couplage algorithme génétique (GA) pour le dimensionnement et programmation dynamique (DP) pour la gestion du système, bien que coûteux en ressources logiciel s'est révélé le plus efficace et surtout le plus robuste. L'algorithme génétique donne, dans notre cas, des résultats reproductibles (même front de Pareto obtenu sur plusieurs optimisations).

Les tableaux 4.2 à 4.4 donnent quelques valeurs sur les temps de calcul obtenus pour les différents processus et modèles utilisés. Les valeurs sont à considérer comme indicatives car pas toutes obtenues exactement sur les mêmes PC ni au même stade de développement des modèles. Les modèles et algorithmes tournent sous Matlab à l'exception des modèles réluctants de machines électriques qui sont résolus par Cades/Reluctool et appelés dans Matlab par l'intermédiaire d'un plugin JAVA. L'algorithme SQP est celui de la suite Matlab. L'algorithme génétique est l'algorithme libre NSGA-II [133] que nous avons adapté et parallélisé pour notre problème. Dans le tableau 4.4 nous utilisons des populations de 100 individus et réalisons des simulations sur 200 générations.

Pour des optimisations d'une architecture parallèle avec des modèles cartographiés de machines électriques, le processus prend environ 2h. Il prend, actuellement, une quinzaine d'heures sur un PC avec 6 cœurs, si nous ajoutons les paramètres de la machine électrique (10 au total) et le modèle réluctant associé. Ce modèle met à lui tout seul environ 4 s ($\S4.3.4$) à générer une cartographie qui sera ensuite utilisée dans le modèle système (fig. 4.1). La programmation dynamique sur une architecture simple de type hybride parallèle met environ 1.5s à résoudre le problème de gestion de l'énergie. Cela peut être plus si l'architecture est plus complexe et s'il faut faire une optimisation du choix des modes et points de fonctionnement du système sur chaque arc ($\S3.3$, fig. 3.3).

Modèle utilisé	Type de calcul			
	calcul simple	cartographie de rendement	processus d'optimisation	
FEM	12 s			
RNM (2 pôles)	0,018 s	10,8 s	15 h	
RNM (1 pôle)	0,009 s	4,4 s	5 h	

Tableau 4.2. Temps de calcul modèle machines électriques

Tableau 4.3. Temps de calcul pour la programmation dynamique ¹

coût des arcs	résolution	total	
0.3 s	1.2 s	1.5 s	

1. les temps sont indiqués pour une architecture de type hybride parallèle et une discrétisation de 1
s et 0.05~% SoC

Tableau 4.4. Temps de calcul processus global ¹

SQP (système + machine)	30 min
NSGA + DP (système + machine)	$15 \ { m h}$
NSGA + DP (système)	2 h

1. Pour une architecture de type hybride parallèle avec 5 paramètres systèmes et 10 paramètres géométriques sur la machine électrique

4.3.3. Comparaison d'architectures

L'utilisation d'une méthode imbriquée algorithme génétique plus programmation dynamique, présentée figure 4.5, avec des méta-modèles de composants (type cartographie), nous a permis de comparer, de façon objective, plusieurs architectures hybrides (EVT-Electric Variable Transmission, architectures à dérivation de puissance type PRIUS ou Ampera, série-parallèle ...) [45, 46, 106, 134].



FIGURE 4.5. Processus de dimensionnement avec algorithme génétique et programmation dynamique

Les figures 4.6 et 4.7 présentent quelques uns des résultats obtenus avec une fonction objectif calculée par pondérations des consommations sur les trois cycles Artémis¹. Les principaux paramètres des véhicules et des composants correspondent à ceux présentés dans l'annexe E.

D'après les données [135], la distance parcourue par les véhicules particuliers se décompose en environ 40 % en zone urbaine, 30 % en zone autoroutière et 30 % en zone routière. En se basant sur ces données, nous proposons l'expression de la fonction objectif suivante :

$$J_1 = 0, 4.J_1^{urb} + 0, 3.J_1^{rout} + 0, 3.J_1^{auto}$$

$$(4.1)$$

où J_1^{urb} , J_1^{rout} , J_1^{auto} représentent les consommations sur cycles urbain, routier et autoroutier.

Les figures présentent les fronts de Pareto consommation-nombre de modules batteries (représentatif de l'énergie stockée par le pack batterie, un module = 46 Wh) pour différentes architectures à dérivation de puissance et série-parallèles. Les architectures sont présentées annexe C.4 pour les architectures THS, EVT, Ampera, et annexe C.3 pour les architectures série-parallèles, les paramètres principaux des composants "de base" utilisés pour ces comparaisons sont présentées annexe E. Nous pouvons observer (fig. 4.6) que les architectures à dérivation de puissance type Toyota ou Opel-Ampera sont les plus performantes. Les solutions à base d'EVT, même en ajoutant un réducteur entre le moteur thermique et la machine électrique [21, 134] restent sensiblement moins performantes en termes de consommation et les solutions simples de type série-parallèle présentent des consommations de plus de 10 % supérieures à celle des hybrides à dérivation de puissance. Ce constat peut être modifié si on ajoute des réducteurs et surtout une boîte de vitesses, même avec seulement deux rapports (fig. 4.7) ou plus. La consommation d'une telle architecture pourrait alors rejoindre celle d'un hybride à dérivation de puissance au prix d'une grande complexité du système (et de sa gestion).

^{1.} Attention à ne pas comparer les résultats des figures entre eux car ils ne sont pas forcément obtenus avec les mêmes contraintes dynamiques sur les véhicules.



FIGURE 4.6. Comparaison de différentes architectures à dérivation de puissance



FIGURE 4.7. Comparaison de différentes architectures à dérivation de puissance

Nous avons également fait ce type d'étude avec d'autres fonctions objectifs, en ajoutant par exemple le volume total des composants (annexe F.5) ou le volume de chaque composants [33]. Cela peut alors laisser libre choix au concepteur, en fonction de critères de coût toujours difficiles à évaluer, de faire un choix définitif. A noter que pour les architectures possédant plusieurs modes (Ampera ou série-parallèle) le processus d'optimisation nous conduit vers des machines électriques de fortes puissances (>75 kW). Cela permet de respecter les contraintes dynamiques (accélération max) en choisissant un mode hybride série permettant de faire fonctionner le moteur thermique sur son point de puissance max. Ajouter des critères de volumes et de coûts devient alors essentiel. Lorsque nous possédons ces coûts en fonction de paramètres des composants (puissance, couple ...) nous pouvons bien sûr choisir directement ce critère comme l'un des objectifs [106].

Ces études présentent de multiples perspectives tant au niveau étude que méthodologie. En l'état elles peuvent être complétées et validées sur d'autres architectures. L'utilisation de modèle dimensionnants pour le pré-dimensionnement et l'optimisation des machines électriques peut modifier ces résultats, no-tamment dans les cas des EVT et architectures séries-parallèles (§4.3.4). Enfin au niveau méthodologique,

des méthodes de génération automatique d'architectures et d'évaluation sont en cours de développement notamment dans la thèse de B. Kabalan (§4.3.5).

4.3.4. Pré-dimensionnement des machines électriques

De façon à affiner le pré-dimensionnement des machines électriques et à répondre aux problèmes de couplages entre les caractéristiques des machines électriques (meilleure zone de rendement, vitesse de base) et des autres composants (rapport de réduction ...) et la gestion d'énergie, des modèles plus précis et dimensionnants des machines électriques (paragraphe 2.2.2) ont été intégrés au processus de dimensionnement (fig. 4.9). Les paramètres géométriques de la (ou des) machine(s) électrique(s) et éventuellement des paramètres discrets (nombre de pôles) sont alors des variables d'optimisation gérées par l'algorithme de dimensionnement. Des modèles à base de réseaux de réluctances et de résistances ont, pour cela, été développés (paragraphe 2.2.2 et articles annexes F.2 et F.3) et intégrés dans le processus global d'optimisation [132, 136]. Les paramètres de la machine qui viennent s'ajouter aux paramètres système sont représentés Figure 4.8.



FIGURE 4.8. Géométries et paramètres des machines électriques

Ces modèles RNM et LPTN sont généralement utilisés pour générer des cartographies ensuite utilisées dans le modèle système (fig. 4.1 et 4.9). Par rapport à l'utilisation de modèles cartographiés, des gains sur la consommation allant jusqu'à 5% et un dimensionnement plus précis des machines peuvent ainsi être réalisés. Des critères sur le volume, le coût ou l'impact environnemental des machines électriques peuvent ainsi être ajoutés.



FIGURE 4.9. Processus de dimensionnement avec modèle RNM des machines électriques

Nous présentons ici quelques résultats majoritairement issus des thèses de V. Reinbold [33] et M. Le-Guyadec ([34].

La figure 4.10 présente les fronts de Pareto, nombre de modules batterie/consommation dans le cas d'un véhicule hybride parallèle pour différentes paires de pôles de la machine électrique (les principaux paramètres des composants sont fournis en annexe D). Si les différences sur la consommation globale du véhicule restent faible, des modèles dimensionnants permettent en revanche de connaître la masse de chacun des constituants de la machine (fig 4.11(a) et 4.11(b)). On pourra ainsi choisir la machine électrique en fonction de critère de coût ou de type "ACV" (production des aimants pas exemple).



FIGURE 4.10. Evolution de la consommation en fonction du nombre de pôles



FIGURE 4.11. Masse des machines dans des systèmes optimaux avec 28 modules batterie

La figure 4.12 présente les fronts de Pareto obtenus pour une architecture de type Série-Parallèle (SPHEV 1 annexe C.5) en utilisant des modèles de machines électriques de type cartographie (avec un coefficient d'homothétie) ou les modèles dimensionnants dans le cas de machines à 8 pôles. Dans notre cas, des gains en consommation de quelques % peuvent alors être observés car le fonctionnement des machines électriques peut être très contraint par le système (annexe F.5). Des modèles dimensionnants permettent alors d'adapter la zone de meilleur rendement des machines à leurs zones de fonctionnement. On remarque d'ailleurs sur les dessins des machines (fig. 4.13(a) et 4.13(b)) correspondant au point avec 28 batterie du front de Pareto que la machine 2 présente un entrefer important qui a tendance à aplatir la caractéristique couple-vitesse et autoriser des vitesses plus élevées de la machine (zone de défluxage). A noter que le nombre de paires de pôles peut aussi être un paramètre important permettant d'adapter les caractéristiques et les zones de fonctionnement des machines au système et à sa gestion.



FIGURE 4.12. Comparaison cartographie modèle RNM



FIGURE 4.13. Géométrie des machines dans des véhicules SPHEV1 optimaux à 25 modules de batteries.

Ces travaux se poursuivent actuellement pour différentes architectures. Ces modèles peuvent être utilisés, soit directement dans le processus de dimensionnement, soit dans un second temps pour affiner le dimensionnement, notamment si les temps de calcul deviennent un paramètre critique (choix de l'architecture §4.3.5). Ces travaux ont, dans un premier temps, été entrepris sur les machines électriques, d'une part parce que c'est un composant sur lequel nous disposons d'une vraie "liberté d'action", d'autre part, nous disposons des compétences et outils nécessaires (IFSTTAR et G2elab) pour mener à bien ces travaux. Des travaux "similaires" sont en cours dans l'équipe sur la partie moteur thermique, a minima sur la commande de ces moteurs qui, là aussi, peut permettre d'adapter les couples et zones de meilleurs rendements au système et à sa gestion. Des travaux devraient aussi être entrepris sur les composants d'électronique de puissance.

4.3.5. Méthodes de dimensionnement multi-niveaux topologie/système/ gestion

Avec la thèse en cours de Bilal Kabalan, nous souhaitons ajouter la dimension "optimisation topologique" à ces travaux. Pour cela, nous tentons d'aller plus loin que les études comparatives d'architectures choisies a priori. L'idée est donc de comparer toutes les architectures possibles avec un panel de composants donné. La figure 4.14 présente la méthodologie que nous sommes en train de mettre en place. Partant d'un certain nombre de composants disponibles et de contraintes, toutes les architectures possibles sont générées. Nous utilisons pour cela des méthodes de programmation par contraintes puis ajoutons une ou des étapes de filtrages pour réduire le nombre d'architectures potentielles. Les architectures retenues seront ensuite modélisées en utilisant un processus de modélisation "automatique" basé sur les modes de fonctionnement possible. Elles seront ensuite dimensionnées, évaluées, et comparées grâce aux méthodes de dimensionnement présentées précédemment ou d'autres méthodes à mettre en place. Les phases génération d'architecture et filtrage sont à ce jour terminées. Les travaux en sont actuellement à la phase de modélisation "automatique". Au final, cette thèse a pour but de déterminer le meilleur compromis complexité/consommation pour différents véhicules de la gamme PSA.

4.4. Conclusion et perspectives

Mes travaux sur les méthodes de dimensionnement des véhicules hybrides ont commencé par des études paramétriques utilisant des cartographies pour comparer des architectures et des dimensionnements, voire faire du dimensionnement ($\S4.3.1$). Nous y avons ensuite ajouté un niveau d'optimisation du système, en travaillant sur le couplage dimensionnement/gestion de l'énergie ($\S4.3.2$) et en réalisant des études comparatives entre différentes architectures hybrides ($\S4.3.3$). Des modèles dimensionnants de machines électriques ont ensuite été développés et insérés dans le processus d'optimisation $\S4.3.4$. Enfin des travaux en cours visent à ajouter le niveau choix de l'architecture et de la topologie de la chaîne de traction $\S4.3.5$.

Les perspectives de ces travaux sont nombreuses, on pourra citer entre autres :

- le développement et l'utilisation de modèles dimensionnants d'autres composants que les machines électriques : moteurs thermiques, convertisseurs, réducteurs.
- l'utilisation d'autres méthodes de gestion de l'énergie, par exemple faire du dimensionnement avec des méthodes à base de règles directement implémentables dans un calculateur véhicule. Ces méthodes pourraient être comparées à des dimensionnements avec des lois optimales suivis du développement de loi de gestion en-ligne à partir de lois optimales.
- au niveau topologie, nous nous sommes, pour l'instant, focalisés sur des architectures sans train épicycloïdal, la suite logique de ces travaux serait de les inclure dans le processus. Cela compliquera, ou modifiera les méthodes de génération d'architecture et de modélisation/évaluation automatique.
- des critères de types ACV, couplés à des problématiques de vieillissement seront pris en compte dans nos dimensionnements. Une collaboration avec le DLR et les membres de mon laboratoire spécialiste des batteries est en phase de démarrage à ce sujet sur des hybrides rechargeables.



FIGURE 4.14. Dimensionnement avec topologie

CHAPITRE 5

Travaux connexes et bilan

Contenu

5.1. Travaux connexes	72
5.1.1 Analyses de sensibilités	72
5.1.2 Optimisation de tracés routiers	72
5.1.3 Gestion de stockeurs d'énergie stationnaires pour le ferroviaire	73
5.2. Bilan	73
5.1. Travaux connexes

Ce dernier chapitre présente dans un premier temps des travaux connexes liés aux activités développées précédemment, puis dans un second temps, présente quelques éléments de bilan des ces activités en termes d'encadrement et de projets.

5.1.1. Analyses de sensibilités

Un début de travail, connexe aux travaux présentés précédemment, est l'analyse de sensibilité de nos modèles et méthodes. Cela peut nous permettre de mieux connaître les paramètres essentiels pour réduire le domaine d'étude, donner des indications sur la précision de nos modèles et donner des indications aux concepteurs sur les grandeurs et données d'entrée sensibles, donc à évaluer avec le plus de précision possible. Des premiers travaux ont été réalisés lors du stage de master de Vincent Reinbold [130]. Le dimensionnement ayant été fait à l'aide de plan d'expérience, nous avons aussi utilisé ces plans d'expérience pour une première étude de sensibilité de notre modèle de véhicule hybride parallèle aux paramètres de dimensionnement. Cela avait montré que notre modèle est beaucoup moins sensible aux rapports de boîte de vitesses et notamment 4^{eme} et 5^{eme} qu'aux autres paramètres (taille machine et batterie, rapport réduction final et coupleur ...).

Des travaux ont été réalisés dans la thèse de Mathias Le-Guyadec pour étudier la sensibilité du modèle thermique des machines électriques [34] à certains paramètres géométriques ou certaines caractéristiques des matériaux (coefficients d'échanges thermiques). Pour cela, des méthodes de type plan d'expérience ([36]) ont été utilisées avec les modèles éléments finis et la méthode des indices de Sobol à été appliquée sur le modèle LPTN [137, 138]. Nous pouvons ainsi connaître les paramètres dont les incertitudes auront le plus d'effet (conductivité des isolants d'encoche) ou au contraire peu d'effet (coefficient d'échange du milieu air-huile interne).

Par ailleurs, avec PSA, j'ai participé à l'encadrement d'un stage sur l'étude de la sensibilité locale et globale de l'ensemble du modèle d'une architecture de type série-parallèle aux paramètres de dimensionnements (puissance des machines et moteurs, rapport de réduction) ([139]). Ces travaux ont permis de montrer que pour une architecture hybride série-parallèle (fig. C.5 SPHEV3) les paramètres les plus sensibles sont le rapport de réduction final, le rapport de réduction du coupleur sur ME1 et la taille de la batterie. Cela est vrai d'un point de vue de la sensibilité globale étudiée par plan d'expérience. Les résultats peuvent être différents d'un point de vue sensibilité locale [140]. Nous avons également tenté, dans ce stage, d'étudier la sensibilité des lois de gestion de l'énergie à ces mêmes paramètres.

Ces travaux pourront se poursuivre notamment pour approfondir la sensibilité des lois de gestion et aussi pour étudier, par exemple, la sensibilité du modèle RNM aux différents paramètres géométriques de la machine électrique et ainsi potentiellement réduire le nombre de variables d'optimisation.

5.1.2. Optimisation de tracés routiers

Les outils de simulation développés dans l'équipe (VEHLIB) permettent de simuler la consommation de véhicules hybrides mais aussi électriques et conventionnels sur un trajet donné avec un profil de vitesse donné. En collaboration avec le laboratoire EASE de Nantes, un projet de développement d'un outil d'optimisation du profil routier a commencé il y a quelques mois et devrait se poursuivre dans les années à venir. L'idée est d'optimiser un profil routier pour en minimiser l'impact environnemental en tenant compte, à la fois, des coûts de construction de la chaussée (remblais et/ou déblais) et des coûts d'utilisation (consommation des véhicules et notamment des poids lourds en fonction du profil de la route donc des pentes). Le logiciels ECORCE [141] développé par le laboratoire EASE permet d'évaluer ces coûts et a donc été utilisé conjointement avec VEHLIB pour évaluer le coût global d'une portion de route. Les premiers résultats montrent un potentiel de réduction de quelques % (5 à 10) des émissions globales de CO_2 par rapport à des méthodes intuitives de détermination du profil routier [142].

Un premier stage de master à déjà eu lieu pour développer un algorithme de type SQP dédié à notre problématique [143, 144].

Ce projet se poursuivra à l'avenir, en travaillant sur la méthodologie et les procédés d'optimisation (algorithme de type génétique ou programmation dynamique) et aussi sur les modèles (meilleure prise en compte de l'impact global, meilleure prise en compte du parc automobile, effet de l'éco-conduite ...).

5.1.3. Gestion de stockeurs d'énergie stationnaires pour le ferroviaire

De façon connexe à ces travaux, j'ai participé à l'encadrement d'un post doc en collaboration avec le G2elab et la SNCF portant sur la modélisation et la gestion de stockeurs d'énergie stationnaires placés sur le bord des voies de chemin de fer. Le but premier de ces dispositifs est de limiter au maximum les phases où l'effort de traction des locomotives est diminué en raison d'une trop grande sollicitation sur le réseau électrique (tension au niveau des sous-stations EDF atteignant un certain seuil). L'étude de l'influence de la taille de ces stockeurs et de nouvelles lois de gestion ont été transmises aux partenaires (SNCF et Adetel) pour modifier les installations actuelles ou mieux prévoir les futures installations [120].

5.2. Bilan

Cette partie donne quelques éléments de bilan en ce qui concerne les encadrements de thésards, CDD et stagiaires puis en termes de projets (plus de détails sont disponibles dans la partie CV étendu annexe G).

La figure 5.1 dresse un bilan de mes encadrements en les replaçant en parallèle du bilan de mes travaux. Les couleurs correspondent à celle du bandeau supérieur par" type de travaux". Les thèses portent très majoritairement sur les méthodes de dimensionnement et d'optimisation (architecture et topologie) et le développement de modèles de machines électriques. Les travaux de stage ont été plus exploratoires, modélisation de convertisseur dans VEHLIB (Van Cuong Nguyen,) début des travaux sur le dimensionnement (Sylvain Perez, Vincent Reinbold), travaux sur l'impact global des véhicules (Nicolas Lepin), début des travaux sur le choix des architectures (Raddika Chatterjee), étude de sensibilité (Taha El-Hajji), travaux sur l'optimisation de tracés routiers (Taha El-Almi). Les travaux de Romain Derollepot ont principalement porté sur des études et pré-dimensionnements d'architectures électriques avec BATT+SC ou d'architectures hybrides.



FIGURE 5.1. Bilan encadrements

La figure 5.2 montre l'articulation entre les différentes thèses et CDD pour développer une méthodologie de dimensionnement des véhicules hybrides. Vincent Reinbold est majoritairement intervenu au niveau méthodologie et modèle réluctant des machines électriques, Mathias Le-Guyadec a eu un apport au niveau modèle thermique et modèle réluctant (prise en compte du nombre de pôle des machines), Romain Derollepot à développé un nouveau modèle complet d'architecture hybride série-parallèle (composants, usage, architecture gestion optimale), enfin Bilal Kabalan apporte la "brique" formalisation d'un problème d'optimisation topologique et évaluation/modélisation d'une architecture "générale".



FIGURE 5.2. Principales contributions thésards et cdd

Les projets auxquels j'ai participé (décrits en détails dans le CV étendu annexe G) sont également représentés figure 5.3 en parallèle de mes activités. Ils ont en premier lieu porté sur l'évaluation et la modélisation d'architectures hybrides (EVALVH-VECSIM) ce qui a permis de disposer de modèles validés d'architectures et de composants dans VEHLIB. Ils ont ensuite concerné le dimensionnement de véhicules et de composants de voitures électriques (VELECTA) et d'embarcations fluviales (PROMO-VAN). Le projet FCCP qui débute portera sur des vélos-cargos avec piles à combustible. A noter aussi la collaboration avec le laboratoire EASE sur l'optimisation des pentes qui se fait sans cadre précis et celle naissante avec le DLR (Projet INOMOB) sur l'impact environnemental et le dimensionnement de véhicule hybride rechargeable.

Enfin, une forte collaboration existe avec le G2elab et particulièrement avec Laurent Gerbaud avec qui nous avons notamment encadré des stages, les thèses de V. Reinbold et M. Le-Guyadec ainsi que le Post-Doc d'A. Ovalie.



FIGURE 5.3. Bilan projets

Conclusion générale et perspectives

Principales contributions

Ces travaux portent sur le développement d'une méthodologie de dimensionnement des Véhicules Électriques Hybrides (VEH) en tenant compte des couplages entre le choix de l'architecture, la gestion de l'énergie, l'optimisation et les composants.

Ces travaux (fig. 5.4) ont débuté par le développement de modèles de composants et de véhicules ainsi que des lois de gestion associées à base de règles simples. Une grosse partie de ces travaux a ensuite concerné le développement de lois de gestion de l'énergie optimales. Forts de ces briques de modélisation et de gestion nous avons ensuite pu nous pencher sur le problème du dimensionnement optimal d'architectures hybrides. Nous tentons actuellement d'élargir encore nos méthodes au problème de l'optimisation au niveau topologique.

Le chapitre 2 présente mes travaux sur le développement de méta-modèles de composants qui ont permis d'alimenter nos modèles de véhicules et d'enrichir la bibliothèque VEHLIB avec de nouvelles architectures. Des modèles dimensionnants magnétiques et thermiques de machines électriques ont ensuite été développés de façon à être insérés dans un processus d'optimisation multi-niveaux pour le dimensionnement des véhicules.

Dans le chapitre 3 nous présentons les travaux entrepris sur la gestion d'énergie et principalement les méthodes de gestion de l'énergie optimales. Une grosse partie a concerné le développement de la programmation dynamique au niveau algorithmique et le développement des modules de calcul pour un grand nombre d'architectures hybrides. Le principe du maximum de Pontryagin a également été étudié et utilisé pour des problèmes à plusieurs variables d'état.

Le chapitre 4 se focalise sur le dimensionnement des VEH en partant de simples études paramétriques pour aller vers un processus global et multi-niveaux de dimensionnement. Ce processus englobera des modules de générations d'architectures, des modules de gestion de l'énergie, des méta-modèles de composants ou des modèles dimensionnants des composants. Des exemples d'application de cette méthodologie (en état partiel de développement) sont également présentés. Ils ont permis de réaliser le pré-dimensionnement de certaines architectures hybrides et leurs comparaisons.

Enfin, le chapitre 5 présente quelques travaux connexes et des éléments de bilan de mes activités.

Perspectives

Les perspectives de ces travaux sont multiples. Sur la figure 5.4 elles ont été ajoutées au déroulement de mes travaux sans forcément d'ordre chronologique.

A court terme, ces travaux se poursuivront en continuant les développements entrepris sur les modèles et méthodes de dimensionnement et d'optimisation des systèmes et de la gestion d'énergie et en appliquant les méthodologies déjà mises en œuvre à d'autres architectures hybrides. A plus long terme un élargissement de ces travaux, en y intégrant des problématiques de type ACV, éco-conduite ou intégration des véhicules dans des systèmes d'énergie (réseaux de recharge) est également prévu, voire a déjà commencé.

De manière plus détaillée on peut envisager :

- Au niveau composants :
 - → le développement de modèles dimensionnants d'autres composants que les machines électriques. Entre autres (voir conclusion du chapitre 3), des travaux sont à entreprendre sur les moteurs thermiques (en cours dans l'équipe), les convertisseurs (onduleurs notamment) et les engrenages.
 - → la modélisation d'autres types de machines électriques : synchrones bobinées ou asynchrones et l'évaluation de l'impact environnemental de ces machines en comparaison de celles à aimants (absence de terres rares).
 - → des études de sensibilité des modèles RNM aux différents paramètres géométriques de la machine électrique pour potentiellement réduire le nombre de variables d'optimisation.
- Au niveau gestion de l'énergie
 - → le développement du Principe du maximum de Pontryagin à d'autres architectures que les architectures hybrides parallèles (série-parallèle et dérivation de puissance).
 - → un travail qui a déjà commencé, sur la méthodologie de formulation et d'application du PMP dans le cas des véhicules hybrides. La simplification des modèles (formules analytiques) et l'utilisation du principe du maximum de Pontryagin en calculant les multiplicateurs de Lagrange à "l'avance" sont des pistes intéressantes, déjà essayées sur des architectures simples de type hybride parallèle qu'il faut valider et étendre à d'autres architectures.
 - → l'utilisation du PMP dans le processus de dimensionnement et "en temps réel", surtout si les méthodes proposées précédemment se sont révélées pertinentes.
- Au niveau dimensionnement des véhicules
 - → l'utilisation de la méthodologie déjà existante et des modèles dimensionnants de machines pour des architectures plus complexes avec deux machines électriques. Des premiers résultats intéressants sur la géométrie des machines sont à confirmer.
 - → l'utilisation de la méthodologie déjà existante sur des véhicules de type vélo-cargo. Le projet FCCP qui débute pour 3 ans sera l'occasion d'élargir encore le champ d'application des véhicules étudiés, en se penchant sur le cas de vélos-cargos électriques munis de piles à combustible et de batteries. La modélisation, la gestion de l'énergie et le dimensionnement de ces architectures seront abordés dans ce projet.

- → la poursuite des travaux sur l'optimisation topologique avec la fin de la thèse de Bilal Kabalan. Ces travaux pourront ensuite être élargis de façon à prendre en compte des architectures avec des trains épicycloïdaux notamment. Cela compliquera, ou modifiera les méthodes de génération d'architecture et de modélisation/évaluation automatique.
- → l'utilisation d'autres méthodes de gestion de l'énergie, par exemple faire du dimensionnement avec des méthodes à base de règles directement implémentables dans un calculateur véhicule. Ces méthodes pourraient être comparées à des dimensionnements avec des lois optimales suivis du développement de lois de gestion à base de règles à partir des lois optimales.
- A un niveau plus "global"
 - → la poursuite du projet sur l'éco-conception des routes avec, notamment, une demande de master et une demande de thèse (bourse IFSTTAR acceptée l'année dernière mais désistement du candidat). Un travail sur la méthodologie et les procédés d'optimisation ainsi que sur les modèles est à réaliser.
 - → l'intégration de modèle de vieillissement de batterie dans nos méthodes de gestion de l'énergie et de dimensionnement. Un travail a débuté en ce sens avec Eduardo Redondo sur le dimensionnement, la gestion en usage et en phase de recharge d'un pack batterie pour des véhicules électriques ou hybrides rechargeables.
 - → la prise en compte d'impacts autres que la production de CO_2 des VEH (approche type ACV). Des stages devraient commencer (début mars 2019) en collaboration avec le DLR sur ce sujet de l'ACV des véhicules hybrides rechargeables dans le cadre du projet INOMOB. Une thèse sur la gestion et le dimensionnement a également été demandée. Des critères de type ACV, couplés à des problématiques de vieillissement seront pris en compte dans le dimensionnement de véhicules hybrides parallèles rechargeables. Ces travaux pourront également s'étendre aux autres architectures.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES



FIGURE 5.4. Travaux et perspectives

Bibliographie

- [1] "https://ourworldindata.org/".
- [2] "https://www.citepa.org/fr/".
- [3] C. Chan, "The state of the art of electric and hybrid vehicles", Proceedings of the IEEE, vol. 90, no. 2, pp. 247–275, 2002.
- [4] K. Jonasson, P. Strandh, M. Alaküla, et al., "Comparative study of generic hybrid topologies", Electric Vehicle Symposium, vol. 18, 2001.
- [5] K. Chau and Y. Wong, "Overview of power management in hybrid electric vehicles", <u>Energy</u> conversion and management, vol. 43, no. 15, pp. 1953–1968, 2002.
- [6] Y. Cheng, L. Horrein, C. Mansour, A. Bouscayrol, and C. Dumand, "Modeling and control optimization for Peugeot 3008 Hybrid4", Proceedings of the SIA International Powertrain Conference : The low CO2 spark ignition engine of the future and its hybridization, Versailles, France, 2015.
- [7] 22nd Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2013, "The Innovative BMW Powertrain in the All New BMW i8", 2013.
- [8] M. Yolga, "AVL 7-and 8-Mode Dedicated Hybrid Transmissions", CTI Symposium China, 2016.
- [9] N. Fremau, A. Villeneuve, A. Kefti-cherif, and A. Vignon, "brevet WO2015/107275: Transmission for motor vehicle with hybrid propulsion and associate control method", 2015.
- [10] W. Xiong, Y. Zhang, and C. Yin, "Optimal energy management for a series-parallel hybrid electric bus", Energy conversion and management, vol. 50, no. 7, pp. 1730–1738, 2009.
- [11] "Development of Motor and PCU for a SPORT HYBRID i-MMD System",
- [12] S. Washino, T. Saito, Y. Jia, H. Okada, R. Savelsberg, and T. Hülshorst, "New 3 Mode Hybrid System Concept", 24th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2015, pp. 1123– 1140, 2015.
- [13] R. Trigui, E. Vinot, and B. Jeanneret, "Backward Modeling and Energy Management Optimization of a Two Clutches Series-Parallel HEV for Efficiency Assessment", Power plant and power system control symposium IFAC PPPSC), 2012, 2012.
- [14] N. Fremau, A. Villeneuve, A. Kefti-cherif, and A. Vignon, "brevet WO2015/197927: Hybris Transmission for motor vehicle with hybrid propulsion and associate control method", 2015.
- [15] SAE Technical Paper, "Development of new-generation hybrid system THS II-Drastic improvement of power performance and fuel economy", 2004.
- [16] X. Zhang, C. T. Li, D. Kum, and H. Peng, "Prius+ and Volt- : Configuration Analysis of Power-Split Hybrid Vehicles With a Single Planetary Gear", <u>IEEE Transactions on Vehicular Technology</u>, vol. 61, pp. 3544–3552, Oct 2012. DOI.

- [17] A. Sciarretta, L. Serrao, P. Dewangan, P. Tona, E. Bergshoeff, C. Bordons, L. Charmpa, P. Elbert,
 L. Eriksson, T. Hofman, et al., "A control benchmark on the energy management of a plug-in hybrid electric vehicle", Control engineering practice, vol. 29, pp. 287–298, 2014.
- [18] E. Vinot, "Comparison of different power-split architectures using a global optimisation design method", Int. J Electric and Hybrid Vehicles, vol. 8, no. 3, pp. 225–241, 2016. DOI.
- [19] J. M. Miller, "Hybrid electric vehicle propulsion system architectures of the e-CVT type", Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 21, no. 3, pp. 756–767, 2006.
- [20] M. J. Hoeijmakers and J. A. Ferreira, "The electric variable transmission", <u>Industry Applications</u>, IEEE Transactions on, vol. 42, no. 4, pp. 1092–1100, 2006.
- [21] E. Vinot, R. Trigui, Y. Cheng, C. Espanet, A. Bouscayrol, and V. Reinbold, "Improvement of an EVT-based HEV using dynamic programming", <u>Vehicular Technology</u>, IEEE Transactions on, vol. 63, no. 1, pp. 40–50, 2014.
- [22] Y. Shi, J. Wei, Z. Deng, and L. Jian, "A Novel Electric Vehicle Powertrain System Supporting Multi-Path Power Flows : Its Architecture, Parameter Determination and System Simulation", Energies, vol. 10, no. 2, p. 216, 2017.
- [23] X. Roboam, "Conception systémique pour la conversion d'énergie électrique 2 : approche intégrée par optimisation",. Lavoisier, 2012.
- [24] E. Silvas, T. Hofman, N. Murgovski, P. Etman, and M. Steinbuch, "Review of optimization strategies for system-level design in hybrid electric vehicles", <u>IEEE Transactions on Vehicular Technology</u>, 2016.
- [25] R. Trigui, B. Jeanneret, and F. Badin, "Systemic modelling of hybrid vehicles in order to predict dynamic performance and energy consumption building the VEHLIB library of models", RTS-Recherche Transports Securite, no. 83, pp. 129–150, 2004.
- [26] R. Trigui, M. Desbois-Renaudin, and B. Jeanneret, "Global Forward-Bacward Approach for a Systematic Analysis and Implementation", EET2004, march 18-20 th, Estoril, Portugal, pp. 4642–4647, 2004.
- [27] IFSTTAR, "Projet EVALVH : Evaluation du véhicule hybride Toyota PRIUS 2004 et de ses composants. Rapport final", 2006.
- [28] E. Vinot, J. Scordia, R. Trigui, B. Jeanneret, and F. Badin, "Model simulation, validation and case study of the 2004 THS of Toyota Prius", <u>International Journal of Vehicle Systems Modelling and</u> Testing, vol. 3, no. 3, pp. 139–167, 2008.
- [29] IFSTTAR, "Rapport d'étude PROMOVAN", 2015.
- [30] R. Derollepot and E. Vinot, "Sizing of a combined series-parallel hybrid architecture for river ship application using genetic algorithm and optimal energy management", <u>Mathematics and Computers</u> in Simulation, pp. 1–30, 2018. DOI.
- [31] R. Bosch, "Automotive Handbook", Robert Bosch GmBH, 2eme ed., 1986.
- [32] IFSTTAR, "développement de modèlees d'optimisation autour de la problématique des véhicules hybrides, Développement de modèles de machines électriques sous CADES", 2017.
- [33] V. Reinbold, "Méthodologie de dimensionnement d'un moteur électrique pour véhicules hybrides. Optimisation conjointe des composants et de la gestion d'énergie.", Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2014.

- [34] M. Le-Guyadec, "Dimensionnement multi-physique des véhicules hybrides de leurs composants et de la commande du système.", Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2018.
- [35] V. Reinbold, E. Vinot, L. Garbuio, and L. Gerbaud, "Magnetic Circuit Model : A Quick and Accurate Sizing Model for Electrical Machine Optimization in Hybrid Vehicles", Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2014 IEEE, pp. 1–5, Oct 2014. DOI.
- [36] M. Le Guyadec, E. Vinot, L. Gerbaud, P. Lombard, A. Chaumond, and T. Boussey, "Building of an electrical machine thermal model in the context of a hybrid electric vehicle global optimization", vppc 2017, pp. 1–6, Decembre 2017.
- [37] B. du Peloux, L. Gerbaud, F. Wurtz, V. Leconte, and F. Dorschner, "Automatic generation of sizing static models based on reluctance networks for the optimization of electromagnetic devices", <u>IEEE</u> Transactions on Magnetics, vol. 42, no. 4, pp. 715–718, 2006.
- [38] A. Boglietti, A. Cavagnino, D. Staton, M. Shanel, M. Mueller, and C. Mejuto, "Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines", <u>IEEE Transactions on industrial</u> electronics, vol. 56, no. 3, pp. 871–882, 2009.
- [39] D. Staton, A. Boglietti, and A. Cavagnino, "Solving the more difficult aspects of electric motor thermal analysis in small and medium size industrial induction motors", <u>IEEE Transactions on</u> Energy Conversion, vol. 20, no. 3, pp. 620–628, 2005.
- [40] SAE Technical Paper, "Validation process of a HEV system analysis model : PSAT", 2001.
- [41] W. Lhomme, "Gestion d'énergie de véhicules électriques hybrides basée sur la représentation énergétique macroscopique", Lille 1, 2007.
- [42] W. Lhomme, R. Trigui, P. Delarue, B. Jeanneret, A. Bouscayrol, and F. Badin, "Switched causal modeling of transmission with clutch in hybrid electric vehicles", <u>IEEE Transactions on Vehicular</u> Technology, vol. 57, no. 4, pp. 2081–2088, 2008.
- [43] R. Chatterjee, "Modelisation of series parallel hybrid vehicle with dual clutch transmission : Optimisation of gear ratio choice", Master's thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble -INPG, 2016.
- [44] IFSTTAR, "Projet EVALVH : Evaluation du véhicule Honda Insight et de ses composants en conditions d'usage", 2005.
- [45] B. Kabalan, E. Vinot, Y. Cheng, R. Trigui, and C. Dumand, "Improvement of a series parallel hybrid electric vehicle architecture", vppc 2017, pp. 1–6, Decembre 2017.
- [46] R. Derollepot and E. Vinot, "Comparison and sizing of different hybrid powertrain architectures for river ship application", Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2016 IEEE, pp. 1–5, Oct 2016.
- [47] C. Akli, "Conception systémique d'une locomotive hybride autonome", Laplace, 2013.
- [48] M. André, "The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions", <u>Science</u> of The Total Environment, vol. 334-335, pp. 73 – 84, 2004.
- [49] IFSTTAR, "Définition des cycles de conduites représentatifs de véhicules aixam", 2011.
- [50] K. Cagatay Bayindir, M. A. Gozukuçuk, 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, 2011.

- [51] T. Hofman, M. Steinbuch, R. Van Druten, and A. Serrarens, "Rule-based energy management strategies for hybrid vehicles", <u>International Journal of Electric and Hybrid Vehicles</u>, vol. 1, no. 1, pp. 71–94, 2007.
- [52] A. Kimura, T. Abe, and S. Sasaki, "Drive force control of a parallel-series hybrid system", <u>JSAE</u> review, vol. 20, no. 3, pp. 337–341, 1999.
- [53] C. R. Akli, X. Roboam, B. Sareni, and A. Jeunesse, "Energy management and sizing of a hybrid locomotive", Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on, pp. 1–10, IEEE, 2007.
- [54] T. Katrasnik, "Hybridization of powertrain and downsizing of IC engine-A way to reduce fuel consumption and pollutant emissions-Part 1", Energy Conversion and Management, vol. 48, no. 5, pp. 1411–1423, 2007.
- [55] T. Furuya, K. Ogawa, and T. Yamamoto, "Drive control for fuel cells and lithium ion battery hybrid railway vehicle", Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC'09. IEEE, pp. 86–91, IEEE, 2009.
- [56] C. Mayet, J. Pouget, A. Bouscayrol, and W. Lhomme, "Influence of an energy storage system on the energy consumption of a diesel-electric locomotive", <u>IEEE transactions on Vehicular Technology</u>, vol. 63, no. 3, pp. 1032–1040, 2014.
- [57] M. Poline, "Contribution aux méthodes de conception et de gestion des systèmes énergétiques multisources par optimisation systémique. Application aux trains hybrides électrique autonomes", Université Grenoble Alpes, 2018.
- [58] B. Huang, Z. Wang, and Y. Xu, "Multi-objective genetic algorithm for hybrid electric vehicle parameter optimization", Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on, pp. 5177–5182, IEEE, 2006.
- [59] C. Bertram, D. Buecherl, A. Thanheiser, and H. Herzog, "Multi-objective optimization of a parallel hybrid electric drive train", Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011 IEEE, pp. 1– 5, IEEE, 2011.
- [60] S. Buerger, B. Lohmann, M. Merz, B. Vogel-Heuser, and M. Hallmannsegger, "Multi-objective optimization of hybrid electric vehicles considering fuel consumption and dynamic performance", Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE, pp. 1–6, IEEE, 2010.
- [61] M.-J. Kim and H. Peng, "Power management and design optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles", Journal of Power Sources, vol. 165, no. 2, pp. 819–832, 2007.
- [62] C. Romaus, K. Gathmann, and J. Bocker, "Optimal energy management for a hybrid energy storage system for electric vehicles based on stochastic dynamic programming", Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE, pp. 1–6, IEEE, 2010.
- [63] J. Liu and H. Peng, "Modeling and control of a power-split hybrid vehicle", <u>Control Systems</u> Technology, IEEE Transactions on, vol. 16, no. 6, pp. 1242–1251, 2008.
- [64] J. Ryu, Y. Park, and M. Sunwoo, "Electric powertrain modeling of a fuel cell hybrid electric vehicle and development of a power distribution algorithm based on driving mode recognition", Journal of Power Sources, vol. 195, no. 17, pp. 5735–5748, 2010.

- [65] A. Rousseau, S. Saglini, M. Jakov, D. Gray, and K. Hardy, "Trade-offs between fuel economy and NOx emissions using fuzzy logic control with a hybrid CVT configuration", <u>Int. J. Automotive</u> Technology, vol. 4, no. 1, pp. 47–55, 2003.
- [66] N. A. Kheir, M. A. Salman, and N. J. Schouten, "Emissions and fuel economy trade-off for hybrid vehicles using fuzzy logic", <u>Mathematics and computers in simulation</u>, vol. 66, no. 2, pp. 155–172, 2004.
- [67] J. Bumby and I. Forster, "Optimisation and control of a hybrid electric car", Control Theory and Applications, IEE Proceedings D, vol. 134, pp. 373–387, IET, 1987.
- [68] L. Serrao, S. Onori, and G. Rizzoni, "ECMS as a realization of Pontryagin's minimum principle for HEV control", Proceedings of the 2009 conference on American Control Conference, pp. 3964–3969, IEEE Press, 2009.
- [69] A. Sciarretta and L. Guzzella, "Control of hybrid electric vehicles", <u>Control systems</u>, IEEE, vol. 27, no. 2, pp. 60–70, 2007.
- [70] N. Kim, S. Cha, and H. Peng, "Optimal control of hybrid electric vehicles based on Pontryagin's minimum principle", <u>Control Systems Technology</u>, IEEE Transactions on, vol. 19, no. 5, pp. 1279– 1287, 2011.
- [71] S. Kermani, R. Trigui, S. Delprat, B. Jeanneret, and T. M. Guerra, "PHIL implementation of energy management optimization for a parallel HEV on a predefined route", <u>Vehicular Technology</u>, IEEE Transactions on, vol. 60, no. 3, pp. 782–792, 2011.
- [72] P. Bubna, D. Brunner, S. G. Advani, and A. K. Prasad, "Prediction-based optimal power management in a fuel cell/battery plug-in hybrid vehicle", <u>Journal of Power Sources</u>, vol. 195, no. 19, pp. 6699–6708, 2010.
- [73] D. E. Kirk, "Optimal control theory", Dover publications Inc, 2012. DOI.
- [74] J. Scordia, M. Desbois-Renaudin, R. Trigui, B. Jeanneret, F. Badin, and C. Plasse, "Global optimisation of energy management laws in hybrid vehicles using dynamic programming", <u>International</u> journal of vehicle design, vol. 39, no. 4, pp. 349–367, 2005.
- [75] M. Koot, J. Kessels, B. de Jager, W. Heemels, P. Van den Bosch, and M. Steinbuch, "Energy management strategies for vehicular electric power systems", <u>Vehicular Technology</u>, IEEE Transactions on, vol. 54, no. 3, pp. 771–782, 2005.
- [76] L. V. Perez, G. R. Bossio, D. Moitre, and G. O. Garcia, "Optimization of power management in an hybrid electric vehicle using dynamic programming", <u>Mathematics and Computers in Simulation</u>, vol. 73, no. 1, pp. 244–254, 2006.
- [77] O. Sundstrom, D. Ambuhl, and L. Guzzella, "On implementation of dynamic programming for optimal control problems with final state constraints", <u>Oil & Gas Science and Technology-Revue</u> de l'Institut Français du Pétrole, vol. 65, no. 1, pp. 91–102, 2010.
- [78] E. Vinot, R. Trigui, Y. Cheng, A. Bouscayrol, and C. Espanet, "Optimal Management and Comparison of SP-HEV vehicles using the dynamic programming method", Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2012 IEEE, pp. 944–949, Oct 2012. DOI.
- [79] E. Vinot, "Time reduction of the Dynamic Programming computation in the case of hybrid vehicle", International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 53, no. 2, pp. 213–227, 2017. DOI.

- [80] V. Larsson, L. Johannesson, and B. Egardt, "Analytic solutions to the dynamic programming subproblem in hybrid vehicle energy management", <u>IEEE Transactions on Vehicular Technology</u>, vol. 64, no. 4, pp. 1458–1467, 2015.
- [81] I. A. Shvartsman and R. B. Vinter, "On the regularity of optimal controls for state constrained problems", Decision and Control, 2004. CDC. 43rd IEEE Conference on, vol. 3, pp. 2285–2290, IEEE, 2004.
- [82] N. Kim, A. Rousseau, and D. Lee, "A jump condition of PMP-based control for PHEVs", Journal of Power Sources, vol. 196, no. 23, pp. 10380–10386, 2011.
- [83] S. Delprat, J. Lauber, T.-M. Guerra, and J. Rimaux, "*Control of a parallel hybrid powertrain : optimal control*", Vehicular Technology, IEEE Transactions on, vol. 53, no. 3, pp. 872–881, 2004.
- [84] S. Delprat, T. Hofman, and S. Paganelli, "Hybrid Vehicle Energy Management : Singular Optimal Control", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 66, no. 11, pp. 9654–9666, 2017.
- [85] A. Chauvin, "Contribution à l'optimisation globale pour le dimensionnement et la gestion d'énergie de véhicules hybrides électriques basée sur une approche combinatoire", laboratoire Ampère - UMR CNRS 5005, France, 2015.
- [86] O. Bossi, "Contribution au dimensionnement et à la gestion par optimisation de systèmes de stockage d'énergie pour les réseaux électriques ferroviaires", Université Grenoble Alpes, 2016.
- [87] V. Reinbold, E. Vinot, and L. Gerbaud, "Joint Optimization of Control and Sizing of the Parallel HEV using SQP Algorithm", Optimization & Inverse Problems in Electromagnetism (OIPE), 2014, 2014.
- [88] N. Murgovski, L. Johannesson, J. Hellgren, B. Egardt, and J. Sjöberg, "Convex optimization of charging infrastructure design and component sizing of a plug-in series HEV powertrain", <u>IFAC</u> Proceedings Volumes, vol. 44, no. 1, pp. 13052–13057, 2011.
- [89] M. Pourabdollah, E. Silvas, N. Murgovski, M. Steinbuch, and B. Egardt, "Optimal sizing of a series PHEV : Comparison between convex optimization and particle swarm optimization", IFAC-PapersOnLine, vol. 48, no. 15, pp. 16–22, 2015.
- [90] S. Caux, D. Wanderley-Honda, D. Hissel, and M. Fadel, "On-line energy management for HEV based on particle swarm optimization", Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE, pp. 1–7, IEEE, 2010.
- [91] E. Vinot, R. Trigui, and B. Jeanneret, "Optimal management of electric vehicles with a hybrid storage system", Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE, pp. 1–6, Sept 2010. DOI.
- [92] A. Castaings, W. Lhomme, R. Trigui, and A. Bouscayrol, "Comparison of energy management strategies of a battery/supercapacitors system for electric vehicle under real-time constraints", <u>Applied</u> Energy, vol. 163, pp. 190 – 200, 2016. DOI.
- [93] E. Vinot and R. Trigui, "Optimal energy management of HEVs with hybrid storage system", <u>Energy</u> Conversion and Management, vol. 76, pp. 437–452, 2013.
- [94] A. Castaings, "Gestion d'énergie de véhicules multi-sources électriques et hybrides au travers de la représentation énergétique macroscopique", Lille 1, 2016.

- [95] T. Pham, P. van den Bosch, J. Kessels, and R. Huisman, "Integrated Online Energy and Battery Life Management for Hybrid Long Haulage Truck", Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2014 IEEE, pp. 1–6, IEEE, 2014.
- [96] J. Kessels, F. Willems, W. Schoot, and P. Van den Bosch, "Integrated energy and emission management for hybrid electric truck with SCR aftertreatment", Proc. of the Vehicle Power and Propulsion Conference, 2010.
- [97] S. Zentner, J. Asprion, C. Onder, and L. Guzzella, "An equivalent emission minimization strategy for causal optimal control of diesel engines", Energies, vol. 7, no. 3, pp. 1230–1250, 2014.
- [98] E. Vinot and B. Jeanneret, "Fuel Consumption vs Pollutant Emission Trade-Off for Hybrid Electric Vehicle : An Application of the Pontryagin's Minimum Principle", Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2014 IEEE, pp. 1–6, Oct 2014. DOI.
- [99] P. Michel, A. Charlet, G. Colin, Y. Chamaillard, G. Bloch, and C. Nouillant, "Optimizing fuel consumption and pollutant emissions of gasoline-HEV with catalytic converter", <u>Control</u> Engineering Practice, 2015.
- [100] G. Ao, J. Qiang, H. Zhong, X. Mao, L. Yang, and B. Zhuo, "Fuel economy and NOx emission potential investigation and trade-off of a hybrid electric vehicle based on dynamic programming", <u>Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D : Journal of Automobile Engineering</u>, vol. 222, no. 10, pp. 1851–1864, 2008.
- [101] R. Johri and Z. Filipi, "Optimal energy management of a series hybrid vehicle with combined fuel economy and low-emission objectives", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D : Journal of Automobile Engineering, vol. 228, no. 12, pp. 1424–1439, 2014. DOI.
- [102] R. Bellman, "Dynamic Programming", Princeton University Press, 1957.
- [103] D. Bertsekas, "Dynamic Programming and optimal control", Belmont, MA : Athena Scientific, 1995.
- [104] V. Reinbold, E. Vinot, L. Garbuio, and L. Gerbaud, "Optimal sizing of an electrical machine using a magnetic circuit model : application to a hybrid electrical vehicle", <u>IET Electrical Systems in</u> Transportation, vol. 6, no. 1, pp. 1–7, 2016. DOI.
- [105] L. Serrao, G. Rizzoni, and S. Onori, "A comparative analysis of energy management strategies for hybrid electric vehicles", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 133, no. 3, p. 031012, 2011.
- [106] B. Kabalan, Y. Cheng, E. Vinot, R. Trigui, and C. Dumand, "Optimal Design and Sizing of Through-The-Road Hybrid Vehicle Powertrain", SIA Powertrain 2018, pp. 1–6, May 2018.
- [107] J. A. Reyer and P. Y. Papalambros, "Optimal design and control of an electric DC motor", Proceedings of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences, pp. 85–96, 1999.
- [108] K. Grigoriadis, G. Zhu, and R. Skelton, "Optimal redesign of linear systems", Journal of dynamic systems, measurement, and control, vol. 118, no. 3, pp. 598–605, 1996.
- [109] W. Gao and C. Mi, "Hybrid vehicle design using global optimisation algorithms", <u>International</u> Journal of Electric and Hybrid Vehicles, vol. 1, no. 1, pp. 57–70, 2007.
- [110] C. Desai and S. S. Williamson, "Optimal design of a parallel Hybrid Electric Vehicle using multiobjective genetic algorithms", Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC'09. IEEE, pp. 871–876, IEEE, 2009.

- [111] Y. Zou, F. Sun, X. Hu, L. Guzzella, and H. Peng, "Combined optimal sizing and control for a hybrid tracked vehicle", Energies, vol. 5, no. 11, pp. 4697–4710, 2012.
- [112] S. Ebbesen, C. Dönitz, and L. Guzzella, "Particle swarm optimisation for hybrid electric drive-train sizing", International Journal of Vehicle Design, vol. 58, no. 2-4, pp. 181–199, 2012.
- [113] E. Silvas, E. Bergshoeff, T. Hofman, and M. Steinbuch, "Comparison of Bi-Level Optimization Frameworks for Sizing and Control of a Hybrid Electric Vehicle", Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2014 IEEE, pp. 1–6, Oct 2014. DOI.
- [114] M. Poline, L. Gerbaud, J. Pouget, and F. Chauvet, "Simultaneous optimization of sizing and energetic management-Application to hybrid train", ELECTRIMACS 2017, 2017.
- [115] Z. Song, X. Zhang, J. Li, H. Hofmann, M. Ouyang, and J. Du, "Component sizing optimization of plug-in hybrid electric vehicles with the hybrid energy storage system", <u>Energy</u>, vol. 144, pp. 393– 403, 2018.
- [116] SAE Technical Paper, "A Fully-Analytical Fuel Consumption Estimation for the Optimal Design of Light-and Heavy-Duty Series Hybrid Electric Powertrains", 2017.
- [117] C. R. Akli, B. Sareni, X. Roboam, and A. Jeunesse, "Integrated optimal design of a hybrid locomotive with multiobjective genetic algorithms", International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 30, no. 3, pp. 151–162, 2009.
- [118] P. Gaillard, "Conception par optimisation d'une chaine de traction électrique et de son contrôle par modélisation multi-physique", Ecole centrale de lille, 2015.
- [119] V. Reinbold, E. Vinot, and L. Gerbaud, "Global optimization of a parallel hybrid vehicle using optimal energy management", Optimization & Inverse Problems in Electromagnetism (OIPE), 2012, 2012.
- [120] A. Ovalle, J. Pouget, S. Bacha, L. Gerbaud, E. Vinot, and B. Sonier, "Energy storage sizing methodology for mass-transit direct-current wayside support : Application to French railway company case study", Applied Energy, vol. 230, pp. 1673–1684, 2018. DOI.
- [121] T. Nuesch, T. Ott, S. Ebbesen, and L. Guzzella, "Cost and fuel-optimal selection of HEV topologies using Particle Swarm Optimization and Dynamic Programming", American Control Conference (ACC), 2012, pp. 1302–1307, IEEE, 2012.
- [122] A. Chauvin, A. Hijazi, E. Bideaux, and A. Sari, "Cost optimization for plug-in integration in a hybrid electric mini-excavator with mixed-integer linear programming", Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2015 IEEE, pp. 1–6, IEEE, 2015.
- [123] X. Zhang, "", University of Michigan, 2015 title = Design of Power Split Hybrid Powertrains with Multiple Planetary Gears and Clutches,.
- [124] W. Zhuang, X. Zhang, Y. Ding, L. Wang, and X. Hu, "Comparison of multi-mode hybrid powertrains with multiple planetary gears", Applied Energy, vol. 178, pp. 624–632, 2016.
- [125] W. Zhuang, X. Zhang, H. Peng, and L. Wang, "Simultaneous Optimization of Topology and Component Sizes for Double Planetary Gear Hybrid Powertrains", Energies, vol. 9, no. 6, p. 411, 2016.
- [126] W. Van Harselaar, T. Hofman, and M. Brouwer, "Automated Dynamic Modeling of Arbitrary Hybrid and Electric Drivetrain Topologies", IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018.

- [127] S. Perez, "Etude Paramétrique de différentes architectures de véhicules hybrides thermiqueélectriques", Master's thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2010.
- [128] IFSTTAR, "Dimensionnement des super-capacités, Application aux Aixam E-city", 2010.
- [129] R. Derollepot and E. Vinot, "Management and Sizing of a combined serial-parallel hybrid architecture for river ship application", Electrimacs 2017, pp. 1–6, July 2017.
- [130] V. Reinbold, "Optimisation multicritère du véhicule hybride parallèle avec prise en compte des lois de gestion optimales", Master's thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2011.
- [131] V. Reinbold, E. Vinot, and L. Gerbaud, "Global optimization of a parallel hybrid vehicle using optimal energy management", <u>International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics</u>, vol. 43, no. 1, pp. 115–126, 2013.
- [132] V. Reinbold, L. Gerbaud, and E. Vinot, "Multi-objective optimization of the sizing of a hybrid electrical vehicle", <u>International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics</u>, pp. 1–25, 2017. DOI.
- [133] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm : NSGA-II", IEEE transactions on evolutionary computation, vol. 6, no. 2, pp. 182–197, 2002.
- [134] E. Vinot, V. Reinbold, and R. Trigui, "Global optimized design of an Electric Variable Transmission for HEVs.", Vehicular Technology, IEEE Transactions on, vol. 65, no. 8, pp. 1–5, 2016. DOI.
- [135] "https://ec.europa.eu/eurostat/web/transport/overview".
- [136] M. Le Guyadec, L. Gerbaud, E. Vinot, V. Reinbold, and C. Dumont, "Use of reluctance network modelling and software component to study the influence of electrical machine pole number on hybrid electric vehicle global optimization", <u>Mathematics and Computers in Simulation</u>, pp. 1–22, 2018. DOI.
- [137] M. Le-Guyadec, L. Gerbaud, and E. Vinot, "Sensitivity Analysis usong Sobols indexes for the thermal modelling of an Electrical Machine for sizing by optimisation", Optimization & Inverse Problems in Electromagnetism (OIPE), 2018, 2018.
- [138] M. Le-Guyadec, L. Gerbaud, E. Vinot, and B. Delinchant, "Sensitivity Analysis using Sobol indices for the thermal modelling of an Electrical Machine for sizing by optimization", <u>COMPEL</u>: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, vol. 1, pp. 1–10, 2019.
- [139] T. El-Hajji, "Modeling Analysis of innovative Hybrid Electric Vehicles", Master's thesis, IFP school, 2018.
- [140] T. El Hajji, B. Kabalan, Y. Cheng, E. Vinot, and C. Dumand, "Sensitivity Analysis on the Sizing Parameters of a Series-Parallel HEV", IFAC : International Symposium on Advances in Automotive Control, pp. 1–7, June 2019.
- [141] A. Julien, M. Dauvergne, and C. Proust, "Road LCA :the dedicated ECORCE tool and database", International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 20, pp. 655–670, 2015.
- [142] P. Vandanjon, E. Vinot, V. Cerezo, A. Coiret, M. Dauvergne, and M. Bouteldja, "Longitudinal profile optimization for roads within an eco-design framework", <u>Transportation Research Part D</u>: Transport and Environment, vol. 67, pp. 642–658, 2019. DOI.

- [143] T. El-Almi, "Optimisation des pentes pour l'éco-conception des routes", Master's thesis, Université de Nantes, 2018.
- [144] P. Vandanjon, E. Vinot, and T. El-Almi, "Slope Optimisation (Sloop) : Tailor-made optimisation for road longitudinal profile ecodesign considering the dynamic of vehicles", VSDIA 2018, pp. 1–9, 5-7 November 2018.
- [145] SAE Technical Paper, "Development of the IMA motor for the V6 hybrid midsize sedan", 2005.
- [146] H. Jelden, N. Pelz, H. Haußmann, and M. Kloft, "The Plug-in Hybrid Drive of the VW Passat GTE", MTZ worldwide, vol. 76, no. 9, pp. 16–23, 2015.
- [147] N. Fremau, A. Kefti-cherif, and A. Vignon, "brevet WO2016/124939 : Hybrid transmission for motor vehicle and method for transmitting the torque of an electric traction machine", 2016.
- [148] P. Zheng, R. Liu, Q. Wu, C. Tong, and Z. Tang, "Compound-structure permanent-magnet synchronous machine used for HEVs", Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on, pp. 2916–2920, IEEE, 2008.
- [149] G. Xizheng, W. Xuhui, Z. Feng, and F. Tao, "Comparison of two different structure of permanent magnet dual mechanical port machine", Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC'08. IEEE, pp. 1–5, IEEE, 2008.
- [150] T. Takaoka and G. Killmann, "Toyota Hybrid Systems", Congrès alternatives énergétiques dans l'automobile, Futuroscope, pp. 1–11, April 2004.
- [151] T. Yaegashi, S. Sasaki, and T. Abe, "Toyota hybrid system : It's concept and technologies", World Automobile Congress (FISITA98), Paris, France, Paper, no. F98TP095, 1998.
- [152] ORNL, "Report on Toyota Prius Motor Thermal Management", 2005.

Annexes

ANNEXE A

Polluants atmosphériques

A.1. Pouvoir de Réchauffement Global et Gaz à effet de serre

Le pouvoir de réchauffement global (PRG) est le rapport entre l'énergie renvoyée vers le sol en 100 ans par 1 kg de gaz et celle que renverrait 1 kg de CO_2 . Il dépend des concentrations et des durées de vie des gaz. Par exemple, 1 kg de CH_4 réchauffera autant l'atmosphère que 25 à 30 kg de CO_2 au cours du siècle qui suit leur émission. Si le CO_2 est le gaz qui a le plus petit pouvoir de réchauffement global, il est celui qui a contribué le plus au réchauffement climatique depuis 1750, du fait des importantes quantités émises. Les facteurs d'émission utilisés pour les principaux gaz à effet de serre (retenus par le GIEC [2]) sont les suivants :

substance	PRG	nom	Utilisation
CO_2	1	dioxyde de carbone	
CH_2	25	méthane	agriculture
N_2O	298	protoxyde d'azote	
SF_6	22800	hexafluorure de soufre	isolant électrique, agriculture
NF_3	17200	trifluorure d'azote	gravure ionique, semi-conducteur
HFC	$2800^{(1)}$	hydrofluorocarbure de soufre	réfrigération, mousses isolantes
PFC	$7600^{(2)}$	perfluorocarbure de soufre	réfrigération, climatisation

(1) : de 140 à 11700, ~ 2800

(2) : de 6500 à 9200, \sim 7600

A.2. Émissions de Polluants et transport : Quelques chiffres niveau français

La fig.A.1 présente l'évolution des quantités de CO_2 émises en France par secteur de 1990 à 2016. Le transport y fait figure de mauvais élève avec quasiment aucune diminution depuis le pic de 126 MT atteint en 2000. A l'inverse, les émissions de polluants ont très nettement diminué comme indiqué par les figures représentant les émissions des principaux polluants en 1990 (fig.A.2) et 2016 (fig.A.3), même si cela peut rester insuffisant (notamment concernant les NO_x),



Emission de CO2 en France par années

sources : CITEPA; https://www.citepa.org/fr/





Emission de polluants en France en 1990

sources : CITEPA; https://www.citepa.org/fr/

FIGURE A.2. Emissions de polluants réglementés en France en 1990



Emission de polluants en France en 2016

sources : CITEPA; https://www.citepa.org/fr/

FIGURE A.3. Emissions de polluants réglementés en France en 2016

ANNEXE B

Formalisme FLux-effort

La modélisation des systèmes utilise très fréquemment un formalisme de type bond-graph ou a minima inspiré du bond-graph pour les connexions entre composants (et parfois aussi au niveau composant).

Pour cela, un certain nombre de grandeurs physiques dites variables de flux ou d'efforts est imposé pour les entrées sorties des composants quel que soit le modèle que l'on implémentera pour le composant lui même.

Ces grandeurs sont fixées pour chaque domaine de la physique et sont présentées dans le tableau B.1

Tableau B.1. Grandeurs utilisées pour les	interconnexions entre le	es composants
---	--------------------------	---------------

domaine de la physique	variable d'effort	variable de flux
électricité	tension	courant
mécanique translation	force	vitesse
mécanique rotation	couple	vitesse de rotation
magnétisme	force magnétomotrice	dérivée du flux
hydraulique	pression	débit volumique
thermodynamique	température	flux d'entropie

ANNEXE C

Bestiaire d'architectures hybrides

C.1. Hybride parallèle

La figure C.1 représente les architectures hybrides parallèles avec les différentes positions que peut occuper la machine électrique (P0 à P4).

On y retrouve notamment les véhicules et architectures suivants :

- architecture de type P1 : Honda Integrated Motor Assist (IMA) [145]
- architecture de type P2 : VW Golf et Passat GTE [146]
- architecture de type P4 dit hybride parallèle par la route : Peugeot 3008 [6]
- architecture de type P4, hybride parallèle par la route mais avec le moteur thermique sur l'essieu arrière (fig. C.2), type BMW i8 [7].

D'autres architectures parallèles complexes existent, par exemple :

- architecture type P2, brevet Renault Eolab 1, avec machine électrique sur 2 rapports de la boîte de vitesse [9].
- architecture parallèle AVL Hybrid 7 modes et Hybrid 8 modes à base de trains épicycloïdaux ou Ravigneaux [8].



FIGURE C.1. Les hybrides parallèles





FIGURE C.2. Hybride par la route avec moteur thermique à l'arrière

C.2. Hybride série



FIGURE C.3. hybride série

C.3. Hybride série parallèle

La figure C.4 représente les architectures hybrides série-parallèles avec les différentes positions que peuvent avoir les machines électriques (P0 à P4). Nous avons étudié de façon comparative des architectures de type P2+P3 avec ou sans coupleur ou boite de vitesse. La figure C.5 représente les architectures de ce type utilisées dans certains travaux de Bilal Kabalan ($\S4.3.3$),[45].

On y retrouve notamment les véhicules et architectures suivants :

- architecture de type P2+P3 : Cleanova (fig. C.5, SPHEV1)
- architecture de type P2+P3 avec boîte de vitesse 2 rapports (synchronizer) proposée par Denso (fig. C.5, SPHEV2) [12]
- architecture série-parallèle pour embarcations fluviales avec deux lignes d'arbres et propulseur d'étrave (fig. C.6) [30]
- architecture de type P1 + P3 : Honda Accord Hybride iMMD (intelligent Multi-Mode Drive) [11]
- architecture de type P2+P3 brevet Renault Eolab 2 [14] et 3 [147] avec moteur thermique et machines électriques connectés à certains rapports d'une boîte 6 vitesses.



FIGURE C.4. hybrides série-parallèles



FIGURE C.5. quelques architectures possible d'hybrides série-parallèles



FIGURE C.6. Hybride série-parallèle pour embarcations fluviales

C.4. Hybride à dérivation de puissance

On retrouve dans cette catégorie :

- l'architecture avec un train épicycloïdal de type Toyota (fig. C.7) utilisée sur plusieurs modèles de la marque (Prius, Auris, Yaris), ainsi que son "adaptation" à des véhicules 4×4 utilisée notamment sur le modèle Highlander (fig. C.9).
- les architectures avec un train épicycloïdal de type Opel Ampera (fig. C.8) [17, 18]
- les architectures de type Electrical Variable Transmissions [20, 148, 149] avec deux machines électriques C.10 ou une machine à double rotor C.11.



FIGURE C.7. Hybride à dérivation de puissance type Toyota



FIGURE C.8. Hybride à dérivation de puissance type Ampera



FIGURE C.9. Hybride à dérivation de puissance type Highlander



FIGURE C.10. Hybride de type Electrical Variable Transmission avec deux machines électriques



 ${\bf Figure\ C.11.}$ Hybride de type Electrical Variable Transmission

ANNEXE D

Données des composants de base du véhicule hybride type Clio
Composants	Notation	Description	Valeur de référence
Moteur thermique	P_{mt}	puissance maximale	54,4 $kW@$ 4000 $tr.min^{-1}$
	Ω_{mt}^{max}	vitesse maximale	$4750\ tr.min^{-1}$
	Ω_{ral}	vitesse de ralenti	$850 \ tr.min^{-1}$
Machine électrique	P_{me}	puissance nominale	$30 \ kW$
	Ω_b	vitesse de base	$1250\ tr.min^{-1}$
	Γ_b	couple maximal	$209 \ N.m$
	p	nombre de pôles	8
	N_e	nombre d'encoches	48
	j_{max}	densité de courant maximale	$12 A/mm^2$
	p_{bat}	puissance nominale d'un module (contient 6 cellules)	$1,05 \ kW$
	c_{bat}	capacité d'un module	6,5 A.h
	u_{bat}	tension à vide d'un module	8,08 V
	$I_{bat,min}$; $I_{bat,max}$	courant min/max à SoC=50 $\%$	-105 A ; 130 A
Convertisseur	U_{bus}	tension du bus continu	325 V
	f_{dec}	fréquence de découpage	$20 \ kHz$
Coupleur	k_{cpl}	rapport de couplage	0,7
	η_{cpl}	rendement	98~%
Réduction	k_{red}	rapport du réducteur final	3,294
	η_{red}	rendement	97~%
	k_{bv}	rapports de la	41/11, 43/21,
		boîte de vitesses	37/28,34/35,31/41
	η_{bv}	rendement	entre 90 et 98 $\%$
Véhicule	M_v	masse à vide	$1020\ kg$
	M_{pas}	charge	$100 \ kg$
	$\alpha_1^{ref}; \alpha_2^{ref}; \alpha_3^{ref}$	loi de route	85;1.38;0.402

Tableau D.1. Caractéristiques des composants de base du véhicule type Clio

ANNEXE E

Données composants véhicules de base type PRIUS-II

Fable 1	Toyota Prius	s components

		Prius 2001	Prius 2004
Vehicle weight		1297 kg	1360 kg
Engine	Displacement	1497 cc	1497 cc
	Max power	52 kW@4500 rpm	57 kW@5000 rpm
Planetary gear	Ratio (ring, planet, sun)	2.6 (78/23/30)	2.6 (78/23/30)
Gear	Ratio	3.905	4.113
Electrical motor	Max power	30 kW	50 kW
	Maximum speed	6000 rpm	6000 rpm
	Maximum voltage in use	275 V	500 V
	Maximum torque	300 Nm (0–940 rpm)	400 Nm (0–1200 rpm)
Electrical generator	Max power	15 kW	30 kW
	Maximum speed	8000 rpm	10000 rpm
	Maximum voltage in use	275 V	500 V
	Maximum torque	145 Nm (0–940 tr/min)	160 Nm (0–1800 tr/min)
Boost converter	Maximum Voltage	None	510 V
NiMh battery	NiMh module number	38	28
	Nominal energy	1.8 kWh	1.3 kWh
	Nominal voltage	273.6 V	201.6 V
Maximum vehicle	Electric mode	50 km/h	60 km/h
speed	Hybrid mode	140 km/h	160 km/h

ANNEXE F

Articles

Cette annexe présente un résumé des articles utilisés dans le manuscrit aux chapitres 2, 3 et 4. Les articles complets, dont la lecture n'est a priori par indispensable à la compréhension du manuscrit, sont disponibles sur l'archive institutionnelle de l'IFSTTAR (MADIS) et sur l'archive ouverte Hal. Les liens précis sont fournis en début de résumé.

F.1. Model simulation, validation and case study of the 2004 THS of Toyota Prius

L'article complet [28] est référencé sous :

E. Vinot, J. Scordia, R. Trigui, B. Jeanneret and F. Badin. "Model simulation, validation and case study of the 2004 THS of Toyota Prius", International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing, Inderscience, 2008, vol. 3, pp. 139-167

Une version auteur est disponible aux liens suivants : http://madis-externe.ifsttar.fr/exl-php/CAS6849 https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02005586

Cet article présente les résultats obtenus suite aux mesures effectuées sur la Toyota PRIUS-II (fig. F.1) dans le projet EVALVH et aux développement de modèles simulink du véhicule, de ces composants et de la gestion d'énergie. Ces travaux ont permis de disposer de modèles de composants et de gestion validés et réutilisables pour faire du dimensionnement et comparer des architectures hybrides.

Les résultats obtenus pour le moteur thermique, le survolteur DC/DC et la gestion de l'énergie sont présentés dans ce résumé. On trouvera également dans l'article complet des résultats concernant la batterie. Des comparaisons simulations/mesures sont ensuite présentées en termes de consommation, performance du véhicule, et gestion du système.



FIGURE F.1. THS architecture

F.1.1. Composants

F.1.1.1. Cartographie du moteur thermique

Pour obtenir une cartographie de consommation il est important de couvrir une zone de fonctionnement du moteur la plus large possible. C'est particulièrement difficile avec le système Toyota dont le but est précisément de faire fonctionner le moteur thermique sur une courbe correspondant à des rendements optimaux et ce indépendamment de la vitesse des roues. "Heureusement" des limitations mécaniques sur les vitesses de rotation des machines électriques et au niveau du train épicycloïdal (voir article complet) obligent le moteur thermique à fonctionner à des couples bien inférieurs à ceux de la courbe optimale, notamment à haute vitesse véhicule. La figure F.2 montre les points de fonctionnement obtenus au banc à rouleau, utilisé en régulation de vitesse, en fonction de la vitesse véhicule. A haute vitesse (>135 km/h) les points de mesures s'éloignent sensiblement de la courbe optimale en rouge. La mesure directe et précise de couple est une chose très compliquée avec un moteur in-situ. Lors de ces essais, une mesure indirecte du couple basée sur la mesure de la pression dans les cylindres est donc réalisée. La consommation est, elle, mesurée par bilan carbone à partir de l'analyse des gaz d'échappement. La figure F.2 présente la cartographie de consommation spécifique obtenue lors de ces mesures. Les meilleures valeurs sont de l'ordre de 225 g/kWh ce qui est très bon par rapport à des moteurs à essence conventionnels et très proche de valeurs indiquées par Toyota [150]. La courbe en rouge représente une courbe moyenne des points de fonctionnement obtenue lors de nos mesures sur cycles d'usages et permet au moteur de fonctionner dans des zones de bon rendement. Elle est utilisée comme cible dans les lois de gestion développées §F.1.1.3.



FIGURE F.2. Specific consumption maps of the ICE in g/kWh and measurement points

F.1.1.2. Survolteur DC/DC

Un survolteur est inséré entre la batterie et les onduleurs et permet d'élever la tension du bus DC/DC lorsque l'une ou les machines électriques fonctionnent à vitesse ou couple élevé. Suite aux différentes mesures réalisées sur le véhicule, nous avons déduit à partir de points stabilisés les cartographies (fig. F.3) des tensions "demandées" par chaque machine en considérant que le survolteur fournira la tension maximale demandée.



FIGURE F.3. Required voltage maps for the electrical machines

Nous modélisons le comportement dynamique du survolteur par une simple fonction de transfert du premier ordre en tension. Les pertes sont calculées à partir de modèles analytiques et des paramètres des composants d'électronique de puissance (charge de recouvrement inverse, résistance de conduction...) et des grandeurs du système (courant batterie, tension de bus, fréquence de découpage ...). La figure F.4 montre une comparaison mesure simulation sur cycle EUDC (partie extra-urbaine du NEDC). Une bonne corrélation est obtenue. La tension minimale est de 220 V (tension batterie) et la tension max de 510 V. Les différences observées (t=900s à 970 s) sont dues aux différences de stratégie (choix des modes électrique hybride).



FIGURE F.4. Boost converter voltage

F.1.1.3. Gestion de l'énergie

Notre "stratégie" de gestion de l'énergie (Fig. F.5) est inspirée de celle présentée dans [52]. Les valeurs des paramètres (required battery power par exemple) ont été déterminées à partir de nos mesures au banc (sur cycles ou essais spécifiques).



FIGURE F.5. THS strategy and management

L'action du conducteur sur la pédale d'accélération est transformée en consigne de couple (T_{req}) sur l'arbre commun à la machine électrique (ME1) et à la couronne du train (C.7). Ce couple est transformé en puissance requise (P_{req}) qui permet de faire le choix du mode électrique ou hybride à partir d'une courbe $(Pdec_{hyb}(SoC))$, et en respectant des limitations sur la vitesse du véhicule (*vehiclespeed > Vmaxele*) et l'état de charge de la batterie ($SoC < SoC_{min}$) qui forcent le mode hybride.

Cas Général :

En mode électrique

Le couple et la vitesse du moteur thermique sont fixés à zéro. La vitesse de la génératrice (ME2) sera imposée par la relation de Willis. La vitesse de ME1 est imposée par la vitesse du véhicule et le rapport de réduction du réducteur final. La batterie fournira la puissance requise pour l'avancement du véhicule, les pertes dans les machines et les accessoires.

En mode hybride

La puissance requise sur l'arbre du moteur thermique est :

 $P_{engine-req} = P_{req} + P_{batt-req} + system$ losses estimation avec $P_{batt-req}$ la puissance demandée par la batterie en fonction du SoC (courbe $P_{batt-rep}(SoC)$). La puissance demandée au moteur thermique est alors comparée à la puissance max disponible.

1. Si le moteur thermique peut répondre à cette demande de couple, les consignes de couple et de vitesses sont fixées par la courbe "optimale" de fonctionnement du moteur (hors limitations de vitesses de ME2 et du train). La vitesse cible de ME2 est calculée par la relation de Willis et sa consigne de couple par une régulation (PID) sur cette vitesse. La consigne de couple sur EM1 vaut alors :

 $T_{em} = T_{req} - T_{ring}$ with $T_{ring} = k/(1-k) * T_{ice}$. te valeur respecte les flux d'énergie (\$ F.1.2.3 et est limité

Cette valeur respecte les flux d'énergie (\$ F.1.2.3 et est limitée en cas de freinage récupératif en mode hybride (*Vehiclespeed > Vmax_{ele}*) par le courant minimum de la batterie (-100 A). Dans cette phase le moteur tourne à 1000 tr/min et couple nul.

La puissance batterie est égale à :

 $P_{batt} = P_{eng} - P_{req} - systemlosses - P_{acc}$ et est quasi égal à $P_{batt-req}$.

2. Si la puissance demandée est supérieure à la puissance disponible par le moteur thermique, les consignes de couple et vitesse moteur thermique sont fixées au maximum disponible. Les couples et vitesses de ME2 sont fixés par les relations au niveau du train épicycloïdal. La consigne de couple de ME1 est limitée par la somme de la puissance fournie par la génératrice plus la puissance maximale que peut fournir la batterie (courant max fonction du SoC). Cette puissance est donc très différente de $P_{batt-req}$ la puissance demandée par la batterie.

F.1.2. Comparaison simulation mesures

F.1.2.1. consommation

La validation de notre modèle à été réalisée sur différents cycles d'usages (urbain, routier et autoroutier) et aussi en comparant les performances dynamiques (accel max).

Le tableau 2 présente une comparaison entre simulations et mesures sur différents cycles de conduite. Les erreurs sur la consommation sont présentées en % dans la dernière colonne et sont de l'ordre de grandeur des erreurs de mesures (<5%). Il est cependant aussi important de valider notre modèle sur des grandeurs instantanées.

Cycle type	Distance (km)	Global time (s)	Stop time (s)	Mean speed (km/h)	Mean speed except stop time (km/h)	Max speed (km/h)	Measured consumption (1/100 km)	Simulated consumption (1/100 km)	Errors (%)*
10–15 modes	4.2	660	207	22.7	33.6	69.97	3.51	3.42	2.6
Urban uses	3.5	560	132	22.3	29.6	57.2	3.88	3.73	3.9
Road uses	11.2	843	82	47.9	53.5	103.4	4.23	4.28	-1.2
Motorway uses	46.2	1804	57	92.2	95.4	138.9	5.49	5.44	0.9

 Table 2
 Consumption expressed at zero battery SoC variation for different cycles

*Error = (Measured–Simulated)/Measured in %.

F.1.2.2. Gestion de l'énergie

Les figures F.6 à F.8 présentent la consommation instantanée et l'évolution de l'état de charge de la batterie sur des cycles 10-15 modes pour différents état de charge initiaux (55.8% fig. F.6, 70% fig.F.7 et 20% fig. F.8). Le fonctionnement du moteur thermique est également représenté pour un état de charge initial de 55.8%.

Les figures montrent une bonne corrélation mesures/simulations, les modèles de composants représentent donc bien ceux de la Prius-II. Cela montre aussi que les lois de gestion de l'énergie sont proches de celles implémentées dans le véhicule. Cela reste vrai y compris pour des états de charge extrêmes différents de conditions "normales" d'utilisation (boost interdit, puissance demandée par la batterie très négative ...). On observe par exemple que pour une batterie très déchargée (fig. F.7) le moteur thermique démarre (donc consomme) même si le véhicule est à l'arrêt. A l'inverse pour un état de charge initial élevé (fig. F.8), la partie du cycle en mode électrique est plus importante que pour un cycle à bilan batterie nul. Cependant, on observe des différences principalement sur la gestion de l'énergie du système. Par exemple, aux instants 180 et 330 figure F.6 le véhicule reste en mode tout électrique alors que, en simulation nous démarrons le mode hybride. Cela peut s'expliquer par une différence sur les lois gérant la stratégie ($Pdec_{hyb}(SoC)$) ou par une vitesse du véhicule différente due au suivi de cycle qui n'est jamais parfait (en mesure notamment). Ces différences sont cependant minimes et énergétiquement peu significatives puisque, au final, à bilan batterie nul, le moteur fournit toute l'énergie. Cela n'influe donc quasiment pas sur la consommation de carburant.



FIGURE F.6. SoC instantaneous consumption and EM operation on 1015 driving cycle at zero SoC variation



FIGURE F.7. SoC and instantaneous consumption on 1015 driving cycle for a battery initially discharged (SoC ini = 20%)



FIGURE F.8. SoC and instantaneous consumption on 1015 driving cycle for a battery initially charged (SoC ini = 70%)

La précision de nos modèles en termes de performances dynamiques est également importante, pas pour la "performance" en tant que telle mais parce que cela est représentatif du confort de conduite par exemple en cas de dépassement.

La figure F.9 montre les accélérations maximales de 0 à 100 km/h pour différents SoC batterie initiaux. On observe ainsi la dégradation des performances, particulièrement quand le SoC est inférieur à 30% et les capacités de boost très limitées. A 20% de SoC, la batterie ne fournit plus aucune puissance (boost interdit) et le véhicule accélère uniquement avec le moteur thermique. Le passage de 0 à 100 km/h prend alors 16.6 s contre 11.4 s avec une batterie suffisamment chargée pour fournir sa puissance max disponible (20 kW). Toyota indique 11s pour le passage de 0 à 100 km/h ce qui montre que le modèle est bien représentatif des performances maximales. Il faut noter que, en simulation, le temps de passage de 0 à 100 km/h, et en particulier de 0 à 50 km/h est plus court que celui mesuré. Cela s'explique notamment par un contact pneu rouleau différent du contact pneu chaussée, un phénomène de patinage apparaissant plus rapidement au banc à rouleau que sur route.



F.1.2.3. Flux d'énergie

En mode hybride, l'énergie dans le système Toyota peut circuler dans deux directions dans ME1 et ME2. Le couple de ME2 est quasiment toujours négatif (opposé à celui du moteur thermique), donc selon la vitesse respective de ME1 (fixée par celle des roues) et celle du moteur thermique, la vitesse de ME2 sera positive ou négative (relation de Willis). La puissance de ME2, donc de ME1, sera donc positive ou négative (Figure F.10).

En supposant que la batterie ne fournit pas d'énergie, deux cas de figure se présentent :

- La puissance de ME2 est négative (généralement à haute vitesse moteur thermique), alors la puissance circule dans une direction intuitive "normale". La puissance arrivant au train épicycloïdal se sépare en deux, une partie part directement vers l'arbre de ME1 donc les roues, l'autre partie circule dans ME2 puis ME1 (dérivation de puissance).
- la puissance de ME2 est positive (faible vitesse/puissance moteur), alors la puissance électrique circule de ME1 vers ME2. La puissance de ME2 s'ajoute à celle du moteur dans le train épicycloïdale, et cette puissance se sépare en deux au niveau de l'arbre de ME1; une partie part aux roues l'autre transite par ME1.

A noter que, dans les deux cas, cette circulation d'énergie entraîne des pertes dans les machines, il devient donc important dans certains cas de minimiser le flux électrique et de ne pas chercher uniquement à "optimiser" le fonctionnement du moteur thermique (meilleur Csp) [151].



FIGURE F.10. Energy flow in THS systems

Les deux modes de circulation de l'énergie peuvent être observés expérimentalement en regardant les puissances dans ME1, ME2 et la batterie. Considérant que la puissance est positive dans les machines quand elles fonctionnent en moteur, si la puissance de ME2 est négative, on a un mode "normal" et si elle est positive, un mode recirculation d'énergie. La figure F.11 présente la puissance de ME2 mesurée et simulée sur la partie extra-urbaine du cycle NEDC, l'alternance entre les deux modes de fonctionnement y est clairement observée. Mesure et simulation sont suffisamment proches pour valider notre modèle,

particulièrement concernant la gestion de l'énergie. A noter que, en mode électrique, une petite puissance existe dans ME2 pour équilibrer le train épicycloïdal.



F.2. Optimal sizing of an electrical machine using a magnetic circuit model : application to a hybrid electrical vehicle

L'article complet [104] est référencé sous :

V. Reinbold, E. Vinot, L. Garbuio and L. Gerbaud. "Optimal sizing of an electrical machine using a magnetic circuit model : application to a hybrid electrical vehicle", IET Electrical Systems in Transportation, 2016, vol. 6, pp. 27-33

Une version auteur est disponible aux liens suivants : http://madis-externe.ifsttar.fr/exl-php/DOC00024119 https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01301720/document

Cette annexe présente uniquement un extrait de l'article concernant le modèle RNM et sa validation avec flux 3D. L'article complet comprend aussi, entre autres, des résultats d'optimisation du système dans deux cas différents : l'un utilisant uniquement un facteur d'échelle, toutes les dimensions de la machine subissent un facteur k et l'autre avec 10 paramètres indépendants. Des écarts de l'ordre de 2% sur la consommation peuvent alors être observés et montrent l'intérêt de modèle dimensionnants de machines électriques.

Modélisation par réseau de réluctance :

Le modèle de circuit magnétique utilise une équivalence magnéto électrique. Il est basé sur la connaissance d'un jeu de paramètres géométriques (fig. F.12) comprenant la largeur de l'entrefer, les dimensions des aimants, le rayon externe du stator, les caractéristiques des bobinages et la longueur de la machine. Cela conduit à un circuit magnétique (fig F.13) où chaque réluctance dépend des paramètres géométriques. Les sources magnétiques dépendent de l'amplitude I des courants et de l'angle interne δ , i.e. l'angle orienté entre les courants et l'axe Q. La méthode de Newton-Raphson est utilisée pour résoudre les équations du circuit électrique et nous donne les flux direct et quadratique dans le circuit. Les tensions dans les axes d et q sont alors calculées ainsi que la puissance électrique de la machine en utilisant des modèles de pertes Joule, pertes fer et pertes mécaniques. Les pertes fer sont calculées par un modèle de Bertotti en ne tenant compte que du premier harmonique. Les pertes mécaniques sont supposées proportionnelles au carré du diamètre extérieur de la machine. L'angle interne de la machine est calculé pour atteindre le couple max par ampère en respectant les contraintes sur la tension. Le modèle de l'onduleur est un modèle analytique faisant intervenir la conduction et les pertes par commutation dans les diodes et IGBT. Les courbes de couple max/min sont calculées à partir des contraintes de courant et tension max. La densité de courant efficace max autorisée est $j_{max} = 12A/mm^2$ pour des raisons d'échauffement thermique.

<u>Validation</u> Une validation a été réalisée en comparant le modèle circuit magnétique (MCM) avec un modèle éléments finis (FEM) développé sous FLUX pour la géométrie de la figure F.12. Ce modèle permet de calculer le couple et les pertes avec précision pour différents points de fonctionnement. Comme le modèle MCM est un modèle au premier harmonique, un tableau comparant l'amplitude du premier harmonique de la tension est proposé (Table 1). Les deux modèles (MCM et FEM) présentent des résultats comparables pour différentes vitesses et courants. A noter que l'angle interne du courant est fixe, d'où des tensions élevées pour des vitesses supérieures à la vitesse de base. Pour valider le modèle de pertes, une comparaison sur les pertes fer statoriques est présentée dans le tableau 2 pour différents points de fonctionnement. Le modèle utilisé en éléments finis est un modèle de Bertotti multi-harmoniques et celui du modèle circuit un modèle au premier harmonique. On observe que les tendances sont respectées et que l'erreur relative reste inférieure à 20%, ce qui reste raisonnable pour un modèle circuit simple.



FIGURE F.12. Geometrical representation of one eighth of the initial IPMSM



FIGURE F.13. Magnetic circuit model of one eighth of the IPMSM

Speed, rpm	Model	First ha	First harmonic voltage amplitude, V			
		<i>I_{em}</i> = 0 A	50 A	100 A	200 A	
600	МСМ	102.0	112.4	117.8	139.1	
	FEM	103.4	117.1	126.0	147.7	
1200	MCM	204.0	226.0	228.3	266.2	
	FEM	207.5	229.8	243.8	269.9	
2400	MCM	408.0	438.0	449.3	520.9	
	FEM	416.0	455.2	479.3	526.4	

Speed, tr min⁻¹ Model Stator iron losses, W 50 A 100 A 200 A 600 MCM 37.4 40.7 50.6 FEM 38.1 43.8 53.3 1200 MCM 84.4 91.6 113.9 FEM 89.5 102.6 130.1 2400 MCM 274.1 203.3 220.6 FEM 230.0 261.5 342.8

F.3. Building of an electrical machine thermal model in the context of a hybrid electric vehicle global optimisation

L'article complet [36] est référencé sous :

M. Le Guyadec, E. Vinot, L. Gerbaud, P. Lombard, A. Chaumond and T. Boussey. "Building of an electrical machine thermal model in the context of a hybrid electric vehicle global optimization", vppc 2017, pp 1-6

Une version auteur est disponible aux liens suivants : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01713398/document http://madis-externe.ifsttar.fr/exl-php/DOC00028587

Cet article présente rapidement les travaux de Mathias Le-Guyadec sur le développement et la validation d'un modèle thermique de machine synchrone à aimant enterrés. Un modèle éléments finis (§F.3.1) a d'abord été développé et validé avec des mesures et a servi au développement d'un modèle circuit (§F.3.2) rapide pouvant être utilisé dans un processus de dimensionnement.

F.3.1. Construction du modèle éléments finis

Le logiciel Flux à été utilisé en statique pour construire le modèle élément finis et comprendre les échanges thermiques. La géométrie est celle de la figure F.14, les dimensions sont représentées figure F.12. Les têtes de bobines sont représentées par des volumes massifs en jaune sur la figure. Les données principales pour la construction du modèle sont fournies dans le tableau F.1. Les pertes injectées dans la machine sont également présentées dans ce tableau. Les pertes Joule et pertes fer sont calculées à partir du modèle réluctant présenté dans [104]. Ces valeurs sont obtenues pour un point de fonctionnement de référence de 180 N.m @ 960 tr/min similaire à celui utilisé dans [152].



FIGURE F.14. EM geometry used for the FEA (Flux).

Les températures obtenues sont représentées figure F.15. La température maximale est de 149° C et est observée dans les têtes de bobine. La figure F.17 donne des résultats complémentaires. Le principal apport de ce modèle est cependant la compréhension des principaux chemins d'échanges thermiques :

- le flux principal va des têtes de bobines vers le carter, environ 92% de la chaleur générée passe par l'interface stator/carter;
- le brouillard d'huile de refroidissement interne permet de limiter la température des têtes de bobine mais il n'y a pas d'échange thermique important à ce niveau;
- le rotor a un impact mineur sur les échanges thermiques





	Characteristics
Volumes	$\lambda : [W \cdot m^{-1} \cdot {}^{\circ}\mathrm{C}^{-1}]$
permanent magnets	$\lambda_{PM} = 47.3$
casing	aluminium / $\lambda_{cas} = 52$
slot (axial)	copper / $\lambda_{slax} = 394$
slot (radial)	copper & insulation / $\lambda_{slrad} = 4.7$
end-winding	copper & insulation / $\lambda_{end} = 4.7$
air gap	oil/air / Couette flow / $\lambda_{gap} = 10$
stator & rotor (axial)	iron / $\lambda_{ax} = 5.21$
stator & rotor (radial)	iron / $\lambda_{rad} = 51.9$
Surfaces	$h: [W \cdot m^{-2} \cdot {}^{\circ} \mathbf{C}^{-1}] \& E: [m]$
stator/casing contact	$\lambda_{ctc} = 0.075 \ / \ E_{ctc} = 6.10^{-5}$
oil equivalent layer	$\lambda_{eq} = 0.0125 \ / \ E_{eq} = 5.10^{-4}$
	$\iff h_{oil} = 25$
slot insulation	Mylar-type material
	$\lambda_{slins}=0.125~/~E_{slins}=19.10^{-5}$
casing forced cooling	$T_{cas} = 97^{\circ}\mathrm{C}$
casing natural cooling	$T_{\infty} = 50^{\circ}\mathrm{C} \ / \ h_{cas} = 5$
Losses	P:[W]
copper losses	$P_{CL} = 935$
iron losses (stator)	$P_{IR} = 84$

Tableau F.1.	Characteristics	of the	finite	element	model
--------------	-----------------	--------	--------	---------	-------

F.3.2. Construction du modèle circuit

Le modèle circuit thermique (LPTN) est développé sous Matlab et est représenté schématiquement figure F.16. Les résultats obtenus avec les éléments finis sont utilisés pour représenter les chemins d'échanges thermiques avec la meilleure précision possible. Le modèle fonctionne comme décrit ci dessous :

- les entrées sont les pertes et les paramètres géométriques du modèle
- les coefficients d'échanges thermiques sont définis à partir de valeurs trouvées dans la littérature
- les sorties sont les températures aux nœuds du modèle

La figure F.16 représente une coupe axiale de la machine. Les dimensions ne sont pas respectées. Le carter (casing) est refroidi par des canaux de refroidissement à eau dont la température est régulée de façon externe. Les pertes Joules (CL) et les pertes fer (IL) sont des sources de chaleur. Les chemins de transfert sont représentés par des résistances thermiques équivalentes :

- en bleu clair pour la conduction
- en bleu foncé pour les contacts
- en vert pour la convection

Les lignes obliques représentent des échanges ortho-radiaux au stator (entre les dents et les encoches dans notre cas). Le refroidissement interne est assuré par un mélange huile/air (brouillard) projeté sur les têtes de bobine (en jaune).



FIGURE F.16. Thermal network considered

Un calcul analytique est réalisé pour trouver la température à chaque nœud. Il suffit pour cela de résoudre le système d'équation linéaire déduit des lois de Kirchoff appliquées à chaque nœud du circuit.

Les résultats sont présentés figure F.17. Elle montre le profil de température à l'intérieur de la machine. Les résultats de référence obtenus avec la méthode des éléments finis sont représentés en bleu. A noter que, avec les éléments finis, la température n'est pas celle d'un point précis mais la valeur moyenne dans le volume considéré. Une fourchette indique donc les températures min/max dans ce volume. Les cercles rouges représentent les températures trouvées avec le modèle LPTN. Les croix représentent la température max dans les têtes de bobines. Les erreurs relatives sur les températures stator et rotor

entre les deux modèles sont inférieures à 3%. Il en est de même pour la température d'huile (120° C) non représentée ici. Une comparaison des flux de chaleur entre modèle FEM et LPTN à montré que ceux-ci sont respectés. La plus grande différence est trouvée au niveau de l'échange entre encoche et stator avec 10% d'erreur.



FIGURE F.17. EM temperature profile. FEA (blue) and LPTN (red) are compared.

F.4. Time reduction of the dynamic programming computation in the case of a hybrid vehicle

L'article complet [79] est référencé sous :

E. Vinot. "Time reduction of the Dynamic Programming computation in the case of hybrid vehicle", International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, IOS Press, 2017, vol 53, pp 1-15

Une version auteur est disponible aux liens suivants : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01474338/document http://madis-externe.ifsttar.fr/exl-php/DOC00026538

Cet article présente les travaux réalisés sur la programmation dynamique en termes de formulation du problème (construction du graphe) et algorithmes de résolution.

Pour les véhicules hybrides, résoudre le problème de programmation dynamique revient à trouver dans le plan SoC en fonction du temps la meilleure "trajectoire" de SoC qui minimise la consommation le long d'un cycle de conduite connu à l'avance. La contrainte sur le SoC final est en général garantie par construction des limites du graphe (fig. F.19). Le problème est ensuite résolu en utilisant le principe d'optimalité de Bellman [102] de manière itérative. Un débit de carburant (coût) est associé à chaque arc entre deux points consécutifs des colonnes k et k+1 (fig. F.20). La consommation sur une trajectoire est simplement la somme des coûts des arcs de cette trajectoire.

Les limites du graphe sont déterminées en calculant l'évolution du SoC le long du cycle en mode tout électrique et en mode hybride avec recharge maximale de la batterie. L'espace SoC(temps) est ensuite discrétisé dans les deux axes. La méthode la plus simple est de faire un "maillage" régulier selon les deux axes (fig. F.19, Regular grid). Avec ce type de maillage, les arcs correspondant au mode tout électrique n'ont aucune chance de correspondre à des arcs présents dans le graphe. Cela peut engendrer des erreurs importantes sur la consommation et ne permet pas de faire un réel choix de la stratégie (mode électrique /hybride). Une solution retenue dans [74] est de considérer l'arc le plus proche comme l'arc électrique et de lui affecter une consommation nulle. Cette méthode peut engendrer de grosses erreurs sur le SoC final qui ne sera pas "respecté", sauf à discrétiser très finement le domaine.

Une solution proposée dans nos travaux est donc de créer un maillage irrégulier" (fig. F.19, Non regular grid) pour que les arcs électriques soient des arcs du graphe. Il suffit pour cela de commencer les arcs d'un point d'une colonne par celui correspondant au mode tout électrique.

Une fois les coûts des arcs calculés plusieurs méthodes de résolution sont envisageables :

- Une méthode "intuitive" qui consiste à utiliser une boucle sur chaque point de chaque colonne dans la boucle sur le temps. Pour chaque point de la colonne k+1 le débit de carburant des arcs pouvant atteindre ce point est ajouté à la consommation associée aux points de la colonne k sur le meilleur chemin de 0 à k (fig. F.18). La trajectoire correspondant à la consommation minimale est alors sélectionnée. L'avantage de cette méthode est que, seuls les arcs "valides" (considérant les limites du système) sont pris en compte. Le principal inconvénient est l'utilisation de deux boucles, ce qui est peu efficace en termes de temps de calcul.
- Une méthode à base de matrices permet de traiter tous les points d'une colonne en une fois en utilisant une matrice creuse de taille M*M (M nombre de points d'une colonne) (F.20. Deux

matrices M*M sont utilisées, l'une avec les coûts des arcs permettant de joindre chaque point de la colonne k+1 (coût mis à Inf si l'arc n'est pas possible), l'autre avec les consommations depuis t=0 associées aux points de la colonne k. Il suffit alors de prendre le min de chaque ligne pour résoudre le problème. L'inconvénient est de traiter avec des matrices très grosses 1000×1000 voire 5000×5000 , ce qui réclame un gros "effort" de calcul pour construire les matrices et réaliser les opérations ci-dessus.

• Une méthode dont l'idée est de construire des matrices uniquement pour les arcs valides dont la taille sera donc très réduite $s_{max} * M$ (fig. F.21). Deux matrices d'indices seront aussi utilisées : l'une contenant sur chaque ligne les indices des points de la colonne k atteignant les points de la colonne k+1. L'autre dont les lignes sont composées des indices dans l'éventail (fig. F.18) des coûts atteignant ces points. Cette méthode permet de travailler avec de "petites" matrices (typiquement 20×1000) pleines qui permettent un gain en effort de calcul.

Les tableaux F.2 et F.3 présentent les temps de calcul pour les trois méthodes pour des discrétisations en SoC de 0.05% et 0.01% pour une architecture de type THS avec les paramètres de l'annexe F.1. La méthode avec des matrices "pleines" y apparaît comme étant la plus efficace et permet des temps de calcul et des résolutions avec une discrétisation de 0.05% (le plus souvent utilisée dans nos calculs), de 2 à 10s, pour une architecture de type THS, (de 1 à 3 seconde pour une architecture hybride parallèle car le calcul des coûts des arcs est beaucoup plus simple).



FIGURE F.18. programmation dynamique : principe



FIGURE F.19. Maillage régulier et irrégulier



FIGURE F.20. Résolution ave des matrices



FIGURE F.21. Résolution avec des matrices pleines

Tableau F.2. Computer effort for different	driving cycle with a grap	h precision of -0.05 $\%$
--	---------------------------	---------------------------

Drive cycle	THS	SPHEV1	EVT	Ampera
Graph précision		-0.0)5	
Time of cycle in s	560	843	1805	1181
Million of edge	3.5	6.3	18	7.9
Time of edge cost calculation in s	1.5	1.9	5.1	2.5
Fuel consumption in $1/100$ km	3.772	4.124	5.309	3.720
		Time to sol [,]	ve DP in s	
A : Point to point method	3.82	7.24	18.7	10.4
B : Matrix method	32	4.9	13.5	6.9
B : Index matrix method	0.6	1.2	4.6	1.9

EVTTHSSPHEV1 AmperaDrive cycle -0.01 Graph précision 560843 18051181 Time of cycle in s 865151435194Million of edge 4.59.32511.6Time of edge cost calculation in s 3.7143.7684.1185.299Fuel consumption in l/100km Time to solve DP in s 20.338.910454A : Point to point method 682106.12485 149B : Matrix method 7.919.823.662.66B : Index matrix method

Tableau F.3. Computer effort for different driving cycle with a graph precision of -0.01 %

F.5. Comparison of different power-split hybrid architectures using a global optimisation method

L'article complet [46] est référencé sous :

E. Vinot. "Comparison of different power-split architectures using a global optimisation design method", Int. J Electric and Hybrid Vehicles, 2016, vol. 8, pp. 225-241.

Une version auteur est disponible aux liens suivants : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01394060v2/document http://madis-externe.ifsttar.fr/exl-php/RIS00000028

Cet article présente notamment les résultats de dimensionnement obtenus en appliquant la méthode présentée chapitre 4 (§4.3.3) aux quatre architectures suivantes :

- architecture de type Toyota (fig. C.7),
- architecture de Série Parallèle sans réducteur supplémentaire (fig. C.5, SPHEV 1),
- architecture de type EVT (fig. C.11) avec un réducteur sur l'arbre du moteur thermique (suite à de précédentes études [21])
- architecture de type Opel Ampera (fig. C.8).

Les composants de "base" (cartographie, châssis véhicule ...) sont ceux de la Toyota PRIUS présentés annexe F.1.

La figure F.22 présente les fronts de Pareto nombre de modules batterie (un module = 46 Wh)/consommation du véhicule, obtenus avec une fonction objectif calculée par pondération des consommations sur les trois cycles Artémis.

$$J_1 = 0, 4.J_1^{urb} + 0, 3.J_1^{rout} + 0, 3.J_1^{auto}$$
(F.1)

où J_1^{urb} , J_1^{rout} , J_1^{auto} représentent les consommations sur cycles urbain, routier et autoroutier.

Nous pouvons observer que les architectures à dérivation de puissance type Toyota ou Opel-Ampera sont les plus performantes. Les solutions à base d'EVT, même en ajoutant un réducteur entre le moteur thermique et la machine électrique [21, 134] restent sensiblement moins performantes en termes de consommation, et les solutions simples de type série-parallèle présentent des consommations de plus de 10 % supérieures à celle des hybrides à dérivation de puissance.

Nous pouvons observer que l'architecture de type Ampera est celle qui présente globalement la plus faible consommation, très légèrement mieux que l'architecture de type PRIUS. Cela est dû à la présence de trois "embrayages" (deux connectés au train épicycloïdal, fig. C.8). Ils permettent de bloquer la couronne du train et donc la machine ME2 dans certains modes de fonctionnement, évitant ainsi des pertes dans ME2. Ce n'est pas le cas dans le système Toyota, et par exemple, en mode électrique, le soleil et la couronne du train tournent (parfois à haute vitesse 5000 à 10000 tr/min). Le rotor de ME2 (à aimant permanent) tourne donc aussi et entraîne des pertes dans la machine. Les architectures de type EVT et série-parallèle présentent les moins bonnes consommations. L'architecture EVT est moins efficace que celles à base de trains épicycloïdaux principalement parce que les points de fonctionnement du système ne peuvent être choisis avec autant de liberté. En particulier ME2 est souvent contrainte de fonctionnement

dans des zones à faibles rendements [21]. Cela est particulièrement vrai dans des conditions de type urbaines à faibles vitesses. Dans ces conditions les moteurs thermiques et électriques des architectures avec des trains épicycloïdaux fonctionnent à relativement haute vitesses et bon rendement. L'architecture série-parallèle est celle qui a les moins bonnes performances. Ne pouvant fonctionner qu'en mode série ou parallèle, les points de fonctionnement des composants ne peuvent pas être choisis avec autant de facilité que dans les architectures à dérivation de puissance. Par ailleurs, les limitations sur les vitesses maximales du moteur thermique notamment, obligent à utiliser fréquemment le mode hybride série. En mode autoroutier avec 30 modules batterie le mode série est utilisé 50 % du temps.

Le tableau F.4 présente des points du front de Pareto et les paramètres optimaux associés pour des packs batterie avec 10, 20 et 30 éléments. Pour les quatre architectures, la taille du moteur thermique décroît quand celle de la batterie augmente. D'un autre côté, la taille des machines électriques (particulièrement ME2) tend aussi à décroître, car si le moteur thermique est moins puissant, moins de puissance sera dérivée en flux série. Les puissances du moteur et des machines sont similaires pour les différentes architectures pour des tailles de batteries équivalentes. Seule l'architecture série-parallèle possède des composants plus puissants. A noter qu'aucune contrainte sur les volumes des composants n'est appliquée.

Pour cela un troisième objectif a été ajouté au processus d'optimisation : le volume du système composé du moteur thermique et des deux machines électriques. A noter que des simulations avec 5 objectifs (un pour chaque volume de composants) ont aussi été réalisées ([33]).

En première approximation, la puissance volumique de ces composants est supposée constante et égale à celle observée dans le système THS (tableau F.6).

La figure F.23 présente les points obtenus sur les fronts de Pareto pour les quatre architectures proposées. L'évolution de la consommation en fonction de la taille de la batterie est présentée figure F.23(a), celle du volume figure F.23(b).

Le tableau F.5 présente quelques points de ce front de Pareto pour des batteries avec 10, 20 et 30 parmi les points qui minimisent le volume du système. L'architecture série-parallèle est celle présentant la plus forte consommation et le plus fort volume. Cela est principalement dû au mode hybride série qui impose de grosses machines électriques. D'un autre côté, les architectures THS et EVT sont les plus compactes. L'architecture Ampera est la plus efficace en termes de consommation mais est un peu moins compacte.



FIGURE F.22. Comparaison de différentes architectures à dérivation de puissance

battery number of elements		10)	
· ·	THS	SPHEV1	EVT	Ampera
ICE power (kW)	80	75	71	75
EM1 electrical power (kW)	63	70	62	82
EM2 electrical power (kW)	47	56	49	72
ICE gear ratio			0.6	
PG ratio	1.5	2.5		
FG ratio				3.84
Fuel consumption $(l/100 \text{km})$	5.06	4.95	5.15	5.48
battery number of elements		20)	
	THS	SPHEV1	EVT	Ampera
ICE power (kW)	57	65	61	61
EM1 electrical power (kW)	51	71	54	70
EM2 electrical power (kW)	40	59	46	72
ICE gear ratio			0.6	
PG ratio	1.5	2.2		
FG ratio				4.09
Fuel consumption $(l/100 \text{km})$	4.63	4.65	4.8	4.99
battery number of elements		30)	
· · ·	THS	SPHEV1	EVT	Ampera
ICE power (kW)	48	55	54	52
EM1 electrical power (kW)	57	72	58	73
EM2 electrical power (kW)	28	42	36	56
ICE gear ratio			0.5	
PG ratio	1.8	2.2		
FG ratio				4.15
Fuel consumption (l/100km)	4.54	4.5	4.68	4.83

Tableau F.4. Dimensionnement pour 10, 20, 30 batteries sur cycle "mixed" artemis avec 2 objectifs



FIGURE F.23. Pareto avec trois objectifs

battery number of elements		10)	
	THS	SPHEV1	EVT	Ampera
ICE power (kW)	65	75	66	83
EM1 electrical power (kW)	52	45	58	82
EM2 electrical power (kW)	45	35	48	75
ICE gear ratio			0.95	
PG ratio	1.5	1.5		
Volume (l)	63	66	65	85
Fuel consumption $(l/100 \text{km})$	4.92	4.98	5.4	5.6
battery number of elements		20)	
	THS	SPHEV1	EVT	Ampera
ICE power (kW)	60	59	56	67
EM1 electrical power (kW)	45	69	61	77
EM2 electrical power (kW)	38	41	50	74
ICE gear ratio			0.81	
PG ratio	1.5	1.7		
Volume (l)	56	60	58	64
Fuel consumption (l/100km)	4.65	4.62	4.91	5.07
battery number of elements		30)	
	THS	SPHEV1	EVT	Ampera
ICE power (kW)	50	50	51	56
EM1 electrical power (kW)	49	70	49	67
EM2 electrical power (kW)	31	35	34	54
ICE gear ratio			0.77	
PG ratio	1.7	1.9		
Volume (l)	48	54	50	60
Fuel consumption $(l/100 \text{km})$	4.55	4.48	4.81	4.86

Tableau F.5. Dimensionnement pour 10, 20, 30 batteries sur cycle "mixed" artemis avec 3 objectifs

	Mechanical power(kW)	Volume (l)
Engine(ICE)	50	39.7
Electrical machine (EM1)	30	9.4
Electrical machine (EM2)	55	4.7

Tableau F.6. Volume et puissnace des composants de base

F.6. Optimal Energy Management of HEVs with Hybrid Storage System

L'article complet [93] est référencé sous :

E. Vinot and R. Trigui. "Optimal energy management of HEVs with hybrid storage system", Energy Conversion and Management, Elsevier, 2013, vol. 76, pp. 437-452

Une version auteur est disponible aux liens suivants : http://madis-externe.ifsttar.fr/exl-php/DOC00015591 https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00881172/document

Cet article présente des règles de gestion de l'énergie pour un véhicule hybride parallèle à deux embrayages avec une source réversible elle même hybride batterie plus supercapacité (fig F.24). Le principe du maximum de Pontryagin y est présenté en considérant deux variables d'état (l'énergie stockée dans la batterie et celle stockée dans la super-capacité). Deux multiplicateurs de Lagrange sont donc déterminés. Des lois à base de règles sont également développées et sont basées exactement sur les mêmes règles que celles présentées au chapitre 3 (§3.2) pour la partie moteur thermique. La partie batterie super-capacité (fig. F.25) est gérée avec des règles basées sur une fréquence de coupure. Ces lois sont paramétrées et les paramètres sont déterminés par des études paramétriques.

Le but de l'optimisation (PMP) et du choix des paramètres des lois de gestion est de minimiser une fonction pondérée consommation/carré du courant efficace batterie le long d'un cycle de fonctionnement. Le courant efficace pouvant être vu comme une représentation de l'usage et de l'échauffement de la batterie donc de son vieillissement.

$$J = \int_{t_0}^{t_f} (d_{carb}(t) + K \cdot I_{batt}^2(t)) dt$$
 (F.2)

Les figures F.26 à F.27(b) présentent les résultats principaux de l'article. La figure F.26 représente les fronts de Pareto consommation/courant efficace de la batterie obtenus en faisant varier K dans le cas de lois de gestion à base de règles ou optimales (PMP). Le nuage de points représente toutes les combinaisons de paramètres balayées pendant l'étude paramétrique pour "tuner" les lois de gestions au mieux. Les lois de gestion à base de règles présentent des résultats qui restent corrects par rapport à l'optimal atteignable (d'autres lois, basées sur d'autres principes, pourraient certainement être encore meilleures).

Les figures F.27(a) et F.27(b) représentent les sollicitations sur la batterie par classe de courant obtenue pour des pondérations différentes en utilisant, soit une gestion à base de règles, soit une gestion optimale. Sur la figure F.27(a) nous représentons, pour une gestion à base de règles, les cas où K=0, on ne minimise que la consommation (point 3,24 l /100km, 58.4 A) et le cas où la consommation a augmenté de seulement 2.9% pour une diminution du courant efficace de 59 % (point 3.34 l/100km, 27.5 A). Sur la figure F.27(b) nous représentons, pour une gestion optimale les cas où K=0, on ne minimise que la consommation (point 3,16 l /100km, 41 A) et K=0.5 (point 3,27 l /100km, 15,4 A).

Il ressort de cette étude que, quelles que soient les lois de gestion, une très faible augmentation de la consommation peut permettre de diminuer grandement les sollicitations de la batterie donc potentiellement son vieillissement.



FIGURE F.24. [hybride parallèle avec stockage hybride



FIGURE F.25. Règles de gestion d'un hybride parallèle avec système de stockage hybride



FIGURE F.26. front de pareto consommation/courant efficace sur cycle NEDC



FIGURE F.27. Sollicitations batterie

ANNEXE G

Curriculum Vitae Etendu
Table des matières

1 Diplômes et déroulement de carrière			
	1.1 Diplômes et titres universitaires	2	
	1.2 Déroulement de carrière	3	
2	Enseignement et formation à la recherche	4	
	2.1 Encadrement	4	
	2.2 Enseignement	6	
	2.3 Participation à des jurys et à des instances ou comités en lien avec l'enseignement et la		
	recherche	7	
3	Production scientifique : bilan	8	
4	Valorisation et transfert	8	
	4.1 Contrat de recherche et contrat industriel	8	
	4.2 Contribution à l'élaboration des politiques publiques	9	
-		0	
Э	5.1 Derticipation à des réseaux de recherche	9	
	5.1 Participation à des reseaux de recherche	9 10	
	5.2 Participation a des conntes editoriaux et expertises d'articles	10	
6	Participation à la vie de l'institut et du laboratoire	10	
7	7 Production scientifique		

EMMANUEL VINOT

Adresse mail : emmanuel.vinot@ifsttar.fr

Date de naissance : 23-11-1972

Organisme employeur : **IFSTTAR** (Institut Français des Sciences et Techniques des Transports de l'Aménagement et des Réseaux)

Affectation actuelle : Département **AME** (Aménagement Mobilité Environnement), **ECO7** (ECO-gestion des Systèmes Énergétiques Pour les Transports),

CR1 depuis janvier 2013

1 Diplômes et déroulement de carrière

1.1 Diplômes et titres universitaires

Avril 2000	Docteur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble			
	LEG (Laboratoire d'Electricité de Grenoble - actuel G2eLab).			
	Mention très honorable avec les félicitations du Jury. (63ème section).			
	Titre : Modélisation des supraconducteurs HTC.			
	Applications au calcul des pertes AC.			
	Composition du Jury :			
	M. Yves BRUNET (Président de l'INPG), Président			
	M. Frédéric BOUILLAULT (Professeur de l'Université Paris XI), Rapporteur			
	M. Pierre MANUEL (Ingénieur EDF et Docteur d'Etat), Rapporteur			
	M. Bertrand DUTOIT (Professeur à l'EPFL), Examinateur			
	M. Pascal TIXADOR (Directeur de Recherche CNRS), Directeur de Thèse			
	M. Gérard MEUNIER (Directeur de Recherche CNRS), Directeur de Thèse			
Mars 1997	Master of electrical science de l'Université Laval de Québec			
	LEEPCI (Laboratoire d'Electrotechnique d'Electronique de Puissance			
	et de Commande Industrielle).			
	Mention Très Bien. (63ème section).			
	Titre : Modélisation des moteurs à aimants permanents asynchrones			
	synchronisés. Conception d'un prototype.			
Septembre 1996	DEA de Génie Electrique			
	LEG (Laboratoire d'Electricité de Grenoble).			
	Mention Très Bien. (63ème section).			
	Titre : Modélisation des moteurs à aimants permanents asynchrones synchronisés.			
Juin 1996	Ingénieur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble			
	ENSIEG (Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs en Electricité de Grenchle)			
	Mention Bien.			

1.2 Déroulement de carrière

Depuis sept. 05	Chargé de recherche à l'IFSTTAR Institut Francais des Sciences et Techniques des Transports de l'Aménagement et des Réseaux, Laboratoires Transport et Environnement (LTE), Equipe Véhicule Electrique et Hybride (VEH). En CDD de sept 05 à sept 08. CR1 depuis le 1er janvier 2013. Etude, modélisation, dimensionnement optimal des véhicules hybrides, de leurs composants, et des stratégies de gestion de l'énergie (essence/électricité).
Sept. 02 à juil. 05	 Chef de Projet R&D chez Moving Magnet Technologies à Besançon (filiale du groupe Sonceboz) Développement et modélisation (Flux2D, Flux3D) de moteurs électriques à réluctance variable et à aimants permanents. Développement sous Flux de programmes utilisateurs pour décrire des aimantations polaires. Etude et développement d'un moteur « magnétique » à onde progressive.
Sept. 01 à août 02	ATER ENSIEG/LEG Modélisation thermique et électromagnétique d'un moteur à aimants permanents 225 000 tr/min, 400 W. Pré-dimensionnement et modélisation d'un moteur homopolaire supraconducteur.
Oct. 00 à juil 01	 Stage Post Doctoral LEEPCI Laboratoire d'Electrotechnique, d'Electronique de Puissance et de Commande Industrielle de Québec Modélisation, optimisation et conception d'une machine à courant continu en matériaux magnétiques frittés. Cette recherche effectuée en liaison étroite avec la compagnie QMP (Québec Métal Powder) a permis, à encombrement égal, un gain de puissance de 30 % par rapport à son équivalent en matériaux feuilletés.
Jan. 98 à sept. 00	 Travaux de thèse au LEG Développement et mise en œuvre d'un modèle électromagnétique pour les supraconducteurs, dans un logiciel de calcul des champs par éléments finis (Flux3d). Mise en place d'une méthodologie de mesure et de caractérisation des fils et bobines supraconducteurs. Valorisation de ces travaux : Insertion d'un module supraconducteur dans F3D Projets européens (BIGPOWA et READY) visant à développer de nouveaux fils supraconducteurs et à développer un transformateur supraconducteur.

Fév 97 à déc 97	Service militaire « Appelé Ville » (animation socio-culturelle) à Gonesse.
Jan 96 à jan 97	Stage de DEA et de Master of electrical science LEEPCI de Québec Modélisation (matlab/simulink) de moteurs à aimants permanents (NdFeBo) à démarrage direct sur le réseau par une cage d'écureuil.
	Conception et test d'un prototype.

2 Enseignement et formation à la recherche

2.1 Encadrement

Thèses :

- B. Kabalan, Thèse sur l'optimisation topologique des architectures hybrides [29][26], fin prévue en mars 2020, bourse CIFFRE-PSA. Co-encadrement avec R.Trigui du LTE-IFSTTAR, Y. Chen et C. Dumand PSA Vélizy. Taux d'encadrement 50.%.
- M. Le-Guyadec, "Dimensionnement multi-physique des véhicules hybrides, de leurs composants et de la commande du système" [78], soutenue en octobre 2018, bourse IFSTTAR. Suite des travaux de thèse de V. Reinbold en ajoutant un modèle thermique des machines électriques et la prise en compte du nombre de pôles [4][27][28]. Co-encadrement avec L.Gerbaud du G2elab (Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble). Taux d'encadrement 50.%. Mathias le Guyadec est actuellement en CDD au CEA de Grenoble. Composition du Jury :
 M. Christophe ESPANET (Président à Sorbonne), Rapporteur, Président du Jury M. Olivier BETHOUX (Professeur de l'Université Paris XI), Rapporteur
 - M. Xavier ROBOAM (Directeur de Recherche, INP-ENSEEIHT), Examinateur
 - M. Nicolas LABBE (Docteur Ingénieur Valéo), Examinateur
 - M. Laurent GERBAUD (Professeur Grenoble-INP), Directeur de Thèse
 - M. Emmanuel VINOT (Chargé de recherches IFSTTAR), Encadrant de Thèse
- V.Reinbold, "Méthodologie de dimensionnement d'un moteur électrique pour véhicules hybrides" [79], soutenue en octobre 2014, bourse Région Rhône -Alpes

Thèse sur le dimensionnement du système et des composants des véhicules hybrides, [7][10][13][36][37][38]. Co-encadrement avec L.Gerbaud du G2elab (Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble). Taux d'encadrement 50.%.

Vincent Reinbold est actuellement maître de conférence au GEEPs/IUT de Cachan. Composition du Jury :

- M. Christophe ESPANET (Président à Sorbonne), Président du Jury
- M. Frederic GILLON (Maître de Conférence ECL), Rapporteur
- M. Xavier ROBOAM (Directeur de Recherche, INP-ENSEEIHT), Rapporteur
- M. Lauric GARBUIO (Maître de Conférence, Grenoble-INP), Examinateur
- M. Philippe-Siad FARAH (Docteur Ingénieur Valéo), Invité
- M. Laurent GERBAUD (Professeur Grenoble-INP), Directeur de Thèse
- M. Emmanuel VINOT (Chargé de recherches IFSTTAR), Encadrant de Thèse

CDD - PostDoc

- B. Colette, CDD IR sur le Projet FCCP (27 mois à partir de février 2019). Modélisation et dimensionnement de Vélo Cargo électrique Batterie plus Pile à Combustible. Taux d'encadrement 60%.
- A. Ovallie (24 mois : mai 2016-mai 2018), Post Doc sur l'insertion de systèmes de stockage stationnaire pour des applications SNCF [3]. Taux d'encadrement 20%.
- R. Derollepot, CDD IR sur le projet PROMOVAN (26 mois : avril 2013 juin 2015). Modélisation et dimensionnement d'architectures hybrides pour embarcations fluviales [30][31]. Taux d'encadrement 100%.
- R. Derollepot, CDD IR sur le projet VELECTA (24 mois : 2010 2012). Réalisation de cycle de conduite pour des véhicules AIXAM, dimensionnement du système de stockage (Batteries/super-capacités) [69][70]. Taux d'encadrement 100%.

Masters - PFE :

- T. El-Hajji, "*Etude de sensibilité sur le dimensionnement des véhicules hybrides*" [81], septembre 2018. Master Electrification et Propulsion Automobile. Encadrement extérieur (stagiaire PSA), co-encadrement avec Y.Cheng (PSA) et B. Kabalan (IFSTTAR-LTE).
- T. El-Almi, "*Optimisation des pentes pour l'éco-conception des routes*" [82], septembre 2018. Master Modélisation Analyse Numérique et Calcul Scientifique. Co-encadrement avec Pierre-Olivier Vandanjon (IFSTTAR-EASE Nantes). Taux d'encadrement 40%.
- R. Chatterjee, "Modelisation of series-parallel hybrid vehicle with dual clutch transmission : Optimisation of gear ratio choice" [83], juillet 2016. PFE-ENSE³. Taux d'encadrement 100%.
- N.Lepin, "Les impacts environnementaux de la voiture électrique, nouveau véhicule, nouveaux enjeux" [85], juillet 2011. PFE-ENSE³ Co-encadrement avec P.Gastineau (IFSTTAR). Taux d'encadrement 40.%

Comparaison des impacts environnementaux $(CO_2$ et autres polluants) d'un véhicule électrique et d'un véhicule thermique.

- V.Reinbold, "Optimisation multicritère du véhicule hybride parallèle avec prise en compte des lois de gestion optimales" [84], juillet 2011. PFE-ENSE³. Taux d'encadrement 100.% Dimensionnement couplé système/gestion d'énergie par plan d'expérience fitté par des fonctions de type Radial Basis Function (RBF) et programmation dynamique. [41]
- S.Perez, "Etude Paramétrique de différentes architectures de véhicules hybrides thermiques-électriques" [86], juillet 2010. PFE-ENSE³. Taux d'encadrement 100%.
- V.C Nguyen, "Modélisation d'entraînement électrique des machines de la Prius II" [87], juillet 2009. PFE-ENSE³. Co-encadrement avec B. Du-Pelloux et L. Gerbaud (G2elab). Taux d'encadrement 30%.

Stages étudiants

• C. Dumont, "*Développement de modèles d'optimisation autour de la problématique du véhicule hybride*", juillet 2016. Stage 2^{me} année ENSE³, co-encadrement avec M. Le-Guyadec et L.Gerbaud (G2elab). Taux d'encadrement 30%.

Changement de modèle de machines électriques sous Cades, passage d'un format de type Icar à Muses [67].

- Projet 2A 2011 modèle moteur prius, Audrey Le Monier, Mélanie Toussaint, Co-encadrement V. Reinbold L. Gerbaud.
- Projet 2A 2010 Etude paramétrique d'un moteur électrique de véhicule hybride ou électrique L. Le Cam, V. Reinbold. Co-encadrement L. Gerbaud et A. Foggia.

2.2 Enseignement

Bilan

Etablissements : ESISAR, Université Laval de Québec, ENSIEG, ECL, ESTACA, INSA, IUT Lyon (License-Pro).

Disciplines : électrotechnique, électronique, mécatronique.

Nature : 64 h de CM, 144 h de TD, 487 de TP/BE, 86 h d'encadrement de projet. Niveaux : écoles d'ingénieurs.

Année	établissement	CM	TD	TP/BE	Projets
2018-2019	IUT Lyon	4		4	
	ECL	6		4	
	INSA	8		8	
	ESTACA	16			
2017-2018	ECL	8		4	
	ESTACA	8			
2016-2017	ECL	8		12	
	ESTACA	8			
2015-2016	ECL	10		12	
2014-2015	ECL			4	
2013-2014	ECL			4	
2012-2013	ECL			4	
2001-2002	ENSIEG			105	86
2000-2001	Ulaval		36	72	
1996-1997	Ulaval		36	72	
1997-2000	ESISAR		72	186	
Total		76	144	491	86

• Module véhicules électriques et Hybrides à l'ECL (Ecole Centrale de Lyon) depuis 2012, à l'INSA (Institut National des Sciences Appliqués de Lyon) de Lyon depuis 2018 et à l'IUT Lyon 1 (License Pro) depuis 2019 (76h à l'ECL, 16h à l'INSA, 8h à l'IUT)

Les véhicules hybrides : généralités, architectures, modélisation, gestion, composants (moteur électrique)...

• Formation continue ESTACA (Ecole Supérieur des Techniques Aéronautiques et de Construction Automobile) depuis 2016,(32h)

Les véhicules hybrides : généralités, architectures, gestion...

• ATER à l'ENSIEG (Ecole Nationale Supérieur d'Ingénieur en Electricité de Grenoble) - 2001-2002, (191 h)

Projet 2^{eme} année en Electronique (56h), TP Electronique de puissance et conversion d'énergie (44h), BE électronique (61 h), projet collectif 2^{eme} année (30 h).

- Assistant à l'Université Laval de Québec- 1996-1997 et 2000-2001, (216 h) TP/TD d'électricité pour ingénieurs (72 heures), TP/TD de machines électriques (72 heures), TP/TD d'électronique de puissance (72 heures).
- Monitorat ESISAR (Ecole Supérieure d'Ingénieurs en Systèmes Industriels Avancés Rhône-Alpes) - 1997-2000, (258 h)
 Moniteur de l'éducation nationale à l'ESISAR département de génie électrique (entre janvier 1998 et juillet 2000). 72 h TD et 186 h TP en 2^{eme} et 3^{eme} années; machines électriques (fonctionnement, caractéristique et commandes) et électronique de puissance (composants, convertisseurs).

2.3 Participation à des jurys et à des instances ou comités en lien avec l'enseignement et la recherche

Participation à des jurys de Thèse

• Poline Marie

Examinateur de la Thèse : Contribution aux méthodes de conception et de gestion des systèmes énergétiques multi-sources par optimisation systémique. Application aux trains hybrides électriques et autonomes. Soutenance le 28 novembre 2018.

Csi : comité de suivi individuel

- Houbaddi Adnane Thésard IFSTTAR-LTE sur la gestion de la recharge d'une flotte de Bus
- Guille des Buttes Alice. Thésarde IFSTTAR-LTE sur la gestion et le dimensionnement de véhicules hybrides en tenant compte du compromis consommation/pollution.
- Baoling Guo Thésarde G2elab sur la gestion d'alternateurs hydrauliques à vitesse variable.
- Poline Marie

Thésarde G2elab sur le dimensionnement optimal de locomotive hybride.

3 Production scientifique : bilan

La liste complète des publications est fournie en fin de document dans la section 7.

Type de publication	nombre total
ACL : Article à comité de Lecture répertoriée dans les BDI JCR, Scopus	23
ACLN : Article à comité de Lecture non répertoriée dans JCR ou Scopus	4
ACTI : Communication avec actes dans un congrès international	38
ACTN : Communication avec actes dans un congrès national	1
BR : Brevet ou Licence Logiciel	3
RAPP : Rapport de Recherche	9
OV : Article de vulgarisation ou intervention colloque	2

4 Valorisation et transfert

4.1 Contrat de recherche et contrat industriel

• FCCP : Fuel Cell Cargo Pedelec, (vélo électrique à pile à combustible). Projet Interreg NWE, 2018-2021 (36 mois), porteur : DLR. Etude énergétique pour le déploiement de vélo cargo et pistes d'améliorations.

Implication : Participation au montage du projet et responsable scientifique pour l'IFSTTAR (laboratoires impliqués LTE-EASE-TEMA).

• PROMOVAN : Navire fluvial à propulsions innovantes, 2013-2015 (30 mois). Projet Feder plus Région. Partenaires : VNF (porteur du projet), CFT, CEA, ENAG, Cabinet Mauric.

Implication : J'étais responsable et coordinateur de la tâche 2 : évaluation de différentes solutions d'hybridation pour des embarcations fluviales de type pousseur, automoteur et vedettes passager. Le responsable projet pour l'IFSTTAR était D.Pillot (CR1, Laboratoire Transport Environnement équipe Energie Pollution de l'Air) (évaluation des émissions de polluants).

Le projet PROMOVAN portait sur l'hybridation des navires fluviaux (péniche autopropulsée, pousseur de barge, vedette fluviale) pour les rendre plus propres et économes. Après une phase de mesures sur les embarcations pour déterminer au mieux l'utilisation et les émissions de polluants et caractériser les navires et leurs usages, une phase d'étude des différentes solutions hybrides a été réalisée pour déterminer la solution la plus pertinente pour chaque type d'embarcation.

Du fait de la complexité de ce type d'embarcation (deux lignes de propulsion et la présence de gros consommateurs d'énergie à bord) nous avons développé, avec Romain Derollepot (CDD IR), des méthodes de gestion des réseaux de bord multi-sources (carburants, batterie, pile à combustible ...) et multi-consommateurs (propulsion, compresseur, réseau électrique de bord, propulseur d'étrave...). La bibliothèque VEHLIB a été enrichie de modèles d'embarcations fluviales et de leurs composants. Les méthodes globales de dimensionnement développées ont ensuite permis de dimensionner et de comparer trois architectures hybrides dédiées aux embarcations fluviales ; parallèle, série et combinées série-parallèle. Des gains de l'ordre de 10 % sur la consommation finale d'embarcation de type pousseur ont ainsi été mis en évidence [30][31][68][69][76].

• VELECTA : Véhicule Electrique de Technologie Avancée, Projet AMI-Ademe, 2010-2012 (30 mois). Partenaires : CEA (porteur du projet), G2elab, Aixam.

Implication : Montage du projet côté IFSTTAR et responsable scientifique pour l'IFSTTAR.

Le projet VELECTA portait sur le dimensionnement du système de propulsion d'un véhicule électrique avec stockage hybride de l'énergie (batterie et super-capacité). L'Ifsttar était, entre

autres, chargé du monitoring et du dimensionnement des packs de super-capacités. Le dimensionnement a été fait de façon globale avec comme objectif la réduction de la consommation et surtout l'augmentation de la durée de vie des batteries.[70][71][73].

- AS-MA : Action Spécifique avec le LMA (Laboratoire Mécanique d'Accidentologie) portant sur le freinage et la dynamique véhicule pendant les freinages d'urgence notamment [72]. Travail réalisé en collaboration avec Bruno Jeanneret (responsable du projet) et les collègues du laboratoire MA sur le fonctionnement et la modélisation des freinages d'urgences de la Toyota Prius (mesures de freinage d'urgence et développement de modèle du fonctionnement de l'ABS et des frottements des pneumatiques par modèle de Pacejka).
- C6E2-SIMPA2 : Simulations pour l'Ingénierie de la Conception des Systèmes Electriques Embarqués, projet ANR, 2005-2009 (42 mois).

Implication : Responsable scientifique pour l'Inrets à partir de 2008. Master de Nguyen Van Cuong [87] sur la modélisation des machines électriques et des convertisseurs de puissance pour des applications véhicules hybrides.

• VECSIM : Projet portant sur la simulation des véhicules conventionnels et hybrides, PREDIT 2002/2006 (48 mois).

Implication : Je suis intervenu dans la dernière année du projet pour les modèles de la Toyota Prius et de la Honda Insight. Ces modèles ont été développés et validés à partir des mesures du projet EVALVH.

• EVALVH : Evaluation des Véhicules Hybrides, projet Ademe, 2000-2005.

Implication : Implication dans la dernière partie du projet sur la Toyota Prius-II.

Evaluation de la Toyota Prius-II et de la Honda Insight [15][74][75]. Réalisation avec l'équipe technique du banc à rouleau de l'IFSTTAR (R.Vidon, B.Malaquin, P.Perret et P. tassel) des essais de la Toyota PRIUS. Caractérisation in-Situ des composants (moteur thermique) et mesures des consommations sur cycles d'essais et à vitesse stabilisée. Réalisation d'essais spécifiques : performances dynamiques, récupérations aux freinages, climatisation, disparité sur les monoblocs de la batterie ...

4.2 Contribution à l'élaboration des politiques publiques

Expert pour la Mission parlementaire sur le verdissement du ferroviaire. Audition en juillet 2018. Cette mission a pour but de faire le point sur les possibilités et les avantages des trains à propulsion hybride (diesel/électrique, caténaire/systèmes de stockage embarqués ou stationnaires) et des trains à base de pile à combustible (expert Denis Candusso IFSTTAR). Député en charge de la mission : Benoit Simian, rapport remis en novembre 2018.

5 Diffusion de la culture scientifique

5.1 Participation à des réseaux de recherche

MEGEVH : (Modélisation Énergétique et Gestion d'Énergie des Véhicules Hybrides et Electriques) groupe thématique du réseau interrégional RT3 du Ministère de la Recherche. Ce réseau regroupe plusieurs universités et industriels français et a pour but de favoriser une approche transdisciplinaire (électrotechnique, mécanique, énergétique, automatique, environnement, chimie...) indispensable au développement de systèmes complexes.

Organisateur du Séminaire 2017 à Lyon : Thème de la journée "stockage et gestion de l'énergie dans les véhicules électriques et hybrides", 25 participants (IFSTTAR, LGEP, L2EP, Ampere, GEEPS, PRISME, FEMTOST, SNCF).

5.2 Participation à des comités éditoriaux et expertises d'articles

Membre de comité d'organisation de Conférences

- Standing chairman VPPC (Vehicular Power and Propulsion Conference) 2017 organisé à Belfort. Session Control and energy management of Transportation Systems.
- Standing Chairman Electrimacs 2017 organisé à Toulouse. Session *Transportation and embedded network applications*.
- Membre du comité scientifique de la conférence VPPC 2016 organisée à Hangzhou. Organisateur et Chairman des Tutoriaux.
- Membre du comité scientifique de la conférence VPPC 2014 organisée à Coimbra. Organisateur et Chairman de la session spéciale *Global Optimisation of The design of HEV Power Train*.
- Membre du comité scientifique de la conférence VPPC 2010 organisée à Lille. Organisateur et Chairman de la session *Vehicular Electronics*.

Reviewing d'articles

- Review pour différentes revues; Energies (en moyenne 3 par an), IEEE-TVT (Transaction on Vehicular Technology) (1 par an), ECM (Energie Conversion Management), IET-Electrical System in transportation, Matcom (MAthematic and computer in Simulation).
- Review pour différentes conférences, (VPPC, Electrimacs).

Evaluation sujet de thèse

1 sujet de thèse CIFFRE ANRT.

6 Participation à la vie de l'institut et du laboratoire

- Membre du bureau d'animation du GERI GNSS (Géo localisation et navigation par satellites) de 2009 à 2011.
- Représentant du personnel au conseil de département AME depuis 2013.
- Représentant du personnel à la commission d'évaluation des chercheurs (comeval) du MTES depuis 2015.
- Organisation des séminaires scientifiques de l'équipe VEH de 2016 à 2018 ans (6 séminaires par an).
- Membre du groupe "communication" du LTE (2017-2018) (affichage poster, Site Web, wiki ...).

7 Production scientifique

ACL : Articles à comité de lecture

- P.O. Vandanjon, E. Vinot, V. Cerezo, A. Coiret, M. Dauvergne, and M. Bouteldja. Longitudinal profile optimization for roads within an eco-design framework. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 67 :642–658, 2019.
- [2] M. Le-Guyadec, L. Gerbaud, E. Vinot, and B. Delinchant. Sensitivity analysis using sobol indices for the thermal modelling of an electrical machine for sizing by optimization. COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 1 :1–10, 2019.
- [3] A. Ovalle, J. Pouget, S. Bacha, L. Gerbaud, E. Vinot, and B. Sonier. Energy storage sizing methodology for mass-transit direct-current wayside support : Application to french railway company case study. *Applied Energy*, 230 :1673–1684, 2018.
- [4] M. Le Guyadec, L. Gerbaud, E. Vinot, V. Reinbold, and C. Dumont. Use of reluctance network modelling and software component to study the influence of electrical machine pole number on hybrid electric vehicle global optimization. *Mathematics and Computers in Simulation*, pages 1–22, 2018.
- [5] R. Derollepot and E. Vinot. Sizing of a combined series-parallel hybrid architecture for river ship application using genetic algorithm and optimal energy management. *Mathematics and Computers* in Simulation, pages 1–30, 2018.
- [6] E. Vinot. Time reduction of the dynamic programming computation in the case of hybrid vehicle. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 53(2):213-227, 2017.
- [7] V. Reinbold, L. Gerbaud, and E. Vinot. Multi-objective optimization of the sizing of a hybrid electrical vehicle. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, pages 1–25, 2017.
- [8] E. Vinot, V. Reinbold, and R. Trigui. Global optimized design of an electric variable transmission for hevs. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 65(8) :1–5, 2016.
- [9] E. Vinot. Comparison of different power-split architectures using a global optimisation design method. Int. J Electric and Hybrid Vehicles, 8(3):225-241, 2016.
- [10] V. Reinbold, E. Vinot, L. Garbuio, and L. Gerbaud. Optimal sizing of an electrical machine using a magnetic circuit model : application to a hybrid electrical vehicle. *IET Electrical Systems in Transportation*, 6(1) :1–7, 2016.
- [11] E. Vinot, R. Trigui, Y. Cheng, C. Espanet, A. Bouscayrol, and V. Reinbold. Improvement of an evt-based hev using dynamic programming. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 63(1):40-50, 2014.
- [12] E. Vinot and R. Trigui. Optimal energy management of hevs with hybrid storage system. Energy Conversion and Management, 76:437–452, 2013.
- [13] V. Reinbold, E. Vinot, and L. Gerbaud. Global optimization of a parallel hybrid vehicle using optimal energy management. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 43(1):115–126, 2013.

- [14] A. Devie, E. Vinot, S. Pelissier, and P. Venet. Real-world battery duty profile of a neighbourhood electric vehicle. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 25 :122–133, 2012.
- [15] E. Vinot, J. Scordia, R. Trigui, B. Jeanneret, and F. Badin. Model simulation, validation and case study of the 2004 ths of toyota prius. *International Journal of Vehicle Systems Modelling* and Testing, 3(3):139–167, 2008.
- [16] F. Grilli, S. Stavrev, Y. Le Floch, M. Costa-Bouzo, E. Vinot, I. Klutsch, G. Meunier, P. Tixador, and B. Dutoit. Finite-element method modeling of superconductors : from 2-d to 3-d. Applied Superconductivity, IEEE Transactions on, 15(1):17–25, 2005.
- [17] M. Costa, E. Martinez, C. Beduz, Y. Yang, F. Grilli, B. Dutoit, E. Vinot, and P. Tixador. 3d modeling of coupling between superconducting filaments via resistive matrix in ac magnetic field. *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, 13(2) :3634–3637, 2003.
- [18] E. Vinot, V. Leconte, G. Meunier, and P. Tixador. Circuit coupling method applied to bulk superconductors. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 38(6) :3661–3664, 2002.
- [19] E. Vinot, G. Donnier-Valentin, P. Tixador, and G. Meunier. Ac losses in superconducting solenoids. Applied Superconductivity, IEEE Transactions on, 12(2):1790–1794, 2002.
- [20] S. Stavrev, F. Grilli, B. Dutoit, I. Klutsch, E. Vinot, P. Tixador, G. Meunier, Pr. Skov-Hansen, and J. Hansen. Numerical modelling of bi-2223 multifilamentary tapes with position-dependent j c. *Physica C : Superconductivity*, 372 :1800–1805, 2002.
- [21] S. Stavrev, F. Grilli, B. Dutoit, N. Nibbio, E. Vinot, I. Klutsch, G. Meunier, P. Tixador, Y. Yang, and E. Martinez. Comparison of numerical methods for modeling of superconductors. *Magnetics*, *IEEE Transactions on*, 38(2) :849–852, 2002.
- [22] G. Donnier-Valentin, P. Tixador, and E. Vinot. Considerations about hts superconducting transformers. Applied Superconductivity, IEEE Transactions on, 11(1):1498–1501, 2001.
- [23] E. Vinot, G. Meunier, and P. Tixador. Different formulations to model superconductors. Magnetics, IEEE Transactions on, 36(4) :1226–1229, 2000.

ACTI : Conférences internationales avec actes publiés

- [24] P.O. Vandanjon, E. Vinot, and T. El-Almi. Slope optimisation (sloop) : Tailor-made optimisation for road longitudinal profile ecodesign considering the dynamic of vehicles. In VSDIA 2018, Budapest, Hungary, pages 1–9.
- [25] M. Le-Guyadec, L. Gerbaud, and E. Vinot. Sensitivity analysis usong sobols indexes for the thermal modelling of an electrical machine for sizing by optimisation. In Optimization & Inverse Problems in Electromagnetism (OIPE), 2018, Hall, Austria.
- [26] B. Kabalan, Y. Cheng, E. Vinot, R. Trigui, and C. Dumand. Optimal design and sizing of throughthe-road hybrid vehicle powertrain. In SIA Powertrain 2018, Orléans, France, pages 1–6.
- [27] M. Le Guyadec, L Gerbaud, E. Vinot, and V. Reinbold. Influence of electrical machine pole number on hybrid electrical vehicle global optimization. In *Electrimacs 2017*, Toulouse, France, pages 1–6.
- [28] M. Le Guyadec, E. Vinot, L. Gerbaud, P. Lombard, A. Chaumond, and T. Boussey. Building of an electrical machine thermal model in the context of a hybrid electric vehicle global optimization. In *vppc 2017*, Belfort, France, pages 1–6.

- [29] B. Kabalan, E. Vinot, Y. Cheng, R. Trigui, and C. Dumand. Improvement of a series parallel hybrid electric vehicle architecture. In *vppc 2017*, Belfort, France, pages 1–6.
- [30] R. Derollepot and E. Vinot. Management and sizing of a combined serial-parallel hybrid architecture for river ship application. In *Electrimacs 2017*, Toulouse, France, pages 1–6.
- [31] R. Derollepot and E. Vinot. Comparison and sizing of different hybrid powertrain architectures for river ship application. In Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2016 IEEE, Hangzhou, China, pages 1–5.
- [32] V. Cerezo, M. Dauvergne, A. Delfosse, and E. Vinot. Assessment of energy consumption of road due to rolling resistance. In *MAIREPAV* : Eighth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements, Singapore, pages 1–10.
- [33] R. Trigui, B. Jeanneret, E. Vinot, and E. R. Eglesias. Eco-driving rules extraction from a model based optimization for a new generation ev. In 2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Montreal, Canada, pages 1–6.
- [34] E. Vinot. Time reduction of the dynamic programming computation in the case of hybrid vehicle. In Optimization & Inverse Problems in Electromagnetism (OIPE), 2014, Delft, Netherlands.
- [35] E. Vinot and B. Jeanneret. Fuel consumption vs pollutant emission trade-off for hybrid electric vehicle : An application of the pontryagin's minimum principle. In Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2014 IEEE, Coimbra, Portugal, pages 1–6.
- [36] V. Reinbold, E. Vinot, and L. Gerbaud. Multi-objective optimization of the sizing of a hybrid electrical vehicle. In Optimization & Inverse Problems in Electromagnetism (OIPE), 2014, Delft, Netherlands.
- [37] V. Reinbold, E. Vinot, L. Garbuio, and L. Gerbaud. Magnetic circuit model : A quick and accurate sizing model for electrical machine optimization in hybrid vehicles. In Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2014 IEEE, Coimbra, Portugal, pages 1–5.
- [38] V. Reinbold, E. Vinot, and L. Gerbaud. Joint optimization of control and sizing of the parallel hev using sqp algorithm. In Optimization & Inverse Problems in Electromagnetism (OIPE), 2014, Delft, Netherlands.
- [39] E. Vinot, R. Trigui, Yuan Cheng, A. Bouscayrol, and C. Espanet. Optimal management and comparison of sp-hev vehicles using the dynamic programming method. In Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2012 IEEE, Seoul, Corea, pages 944–949.
- [40] R. Trigui, E. Vinot, and B. Jeanneret. Backward modeling and energy management optimization of a two clutches series-parallel hev for efficiency assessment. In *Power plant and power system* control symposium IFAC PPPSC), 2012, Toulouse, France.
- [41] V. Reinbold, E. Vinot, and L. Gerbaud. Global optimization of a parallel hybrid vehicle using optimal energy management. In Optimization & Inverse Problems in Electromagnetism (OIPE), 2012, Ghent, Belgium.
- [42] A. Florescu, H. Turker, S. Bacha, and E. Vinot. Energy management system for hybrid electric vehicle : Real-time validation of the vehilb dedicated library. In Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011 IEEE, Chicago, USA, pages 1–6.
- [43] E. Vinot, R. Trigui, and B. Jeanneret. Optimal management of electric vehicles with a hybrid storage system. In Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE, Lille, France, pages 1–6.

- [44] J.K. Reed, J. McFarland, J. Tangudu, E. Vinot, R. Trigui, G. Venkataramanan, S. Gupta, and T. Jahns. Modeling power semiconductor losses in hev powertrains using si and sic devices. In *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2010 IEEE, Lille, France, pages 1–6.
- [45] K. Chen, R. Trigui, A. Bouscayrol, E. Vinot, W. Lhomme, and A. Berthon. A common model validation in the case of the toyota prius ii. In *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2010 IEEE, Lille, France, pages 1–5.
- [46] R. Trigui, E. Vinot, and M. Boujelben. Offline optimization for components sizing and analysis of a plug-in hybrid urban microbus. In Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE, Dearborn, USA, pages 382–387.
- [47] E. Vinot, R. Trigui, B. Jeanneret, and J. Scordia. A complete set of tools for hybrid vehicle design : from cybernetics model to hardware in the loop simulation. In *Les rencontres scientifique de l'IFP-Advances in Hybrid Powertrains*, 2008, Ruel-Malmaison, France.
- [48] E. Vinot, R. Trigui, B. Jeanneret, J. Scordia, and F. Badin. Hevs comparison and components sizing using dynamic programming. In *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2007. VPPC 2007. IEEE, Arlington, USA, pages 314–321.
- [49] E. Vinot and D. Frachon. A polar magnetization model inserted in finite element method software. In ISEF 2005, Baiona, Spain, pages 1–6.
- [50] D. Frachon, E. Vinot, G. Andrieux, and JD. Alzingre. An efficient bldc with gearbox solution for egr. In *ISEF 2005*, Baiona, Spain, pages 1–7.
- [51] F. Badin, J. Scordia, R. Trigui, E. Vinot, and B. Jeanneret. Hybrid electric vehicles energy consumption decrease according to drive train architecture, energy management and vehicle use. In *Hybrid Vehicle Conference (Conf. Pub. CP526)*, *IET*, pages 213–224.
- [52] E. Vinot and J. Tbatou. Reduction of noise in a mmt patented bldc motor. In International conference on electrical machine (ICEM), 2004, Cracow, Poland.
- [53] F. Grilli, S. Stavrev, B. Dutoit, Y. Lefloch, E. Vinot, I. Klutsch, P. Tixador, and G. Meunier. Modelling of superconductors : from 2d to 3d. In (CEFC), 2002 IEEE, Perugia, Italia.
- [54] M. Costa, E. Martinez, C. Beduz, Y. Yang, F. Grilli, B. Dutoit, E. Vinot, and P. Tixador. 3d modelling of coupling between superconducting filaments via resistive matrix in ac magnetic field. In *Applied superconductivity conference (ASC)*, 2002 IEEE, Houston, USA.
- [55] S. Stavrev, B. Dutoit, F. Grilli, I. Klutsch, E. Vinot, P. Tixador, G. Meunier, P. Skov-Hansen, and J. Bindslev Hansen. Numerical modelling of bi-2223 multifilamentary tapes with anisotropic and position-dependent jc(b). In *European conference on applied superconductivity (EUCAS)*, 2001, Lengby, Denmark.
- [56] S. Stavrev, F. Griili, B. Dutoit, N. Nibbio, E. Vinot, I. Klutsch, G. Meunier, P. Tixador, Y. Yang, and E. Martinez. Comparison of numerical methods for modelling of superconductors. In *Computation on magnetism (Computing), 2001 IEEE*, Evian, France.
- [57] E. Vinot, G. Meunier, and P. Tixador. Superconducting model with circuit coupling in 2d or axisymetrical cases. In (CEFC), 2000 IEEE, Milwaukee, USA.
- [58] G. Donnier-Valentin, P. Tixador, and E. Vinot. Considerations about superconducting transformers. In Applied superconductivity conference (ASC), 2000 IEEE, Virginia beach, USA.
- [59] E. Vinot, P. Tixador, and G. Gonnier-Valentin. Superconductor modelling : an useful tool for ac losses. In European conference on applied superconductivity (EUCAS), 1999, Barcelona, Spain.

- [60] E. Vinot, G. Meunier, and P. Tixador. Modelling superconductors with a power law. In International symposium in electromagnetism (ISEM), 1999, Pavia, Italy.
- [61] E. Vinot, G. Meunier, and P. Tixador. Different formulations to model superconductors. In *Computation on magnetism (Computag), 1999 IEEE*, Sapporo, Japan.

ACLN : Articles à comité de lecture non repertorié

- [62] E. Vinot and D. Frachon. A polar magnetization model inserted in finite element method software. Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering : Proceedings of ISEF'05, 27 :260, 2006.
- [63] D. Frachon, E. Vinot, G. Andrieux, and JD. Alzingre. An efficient bldc with gearbox solution for egr. Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering : Proceedings of ISEF'05, 27:319, 2006.
- [64] F. Badin, R. Trigui, and E. Vinot. Hybrid electric vehicles concepts and potentials. Mobility and Vehicle Mechanics, 32(3-4):47–53, 2006.
- [65] E. Vinot and P. Meunier, G.and Tixador. Modeling superconductors with a power law. Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Non-Linear Electromagnetic Systems, 18 :179–182, 2000.

ACTN : Conférences nationales avec actes

[66] P. Tixador E. Vinot. Modélisation des pertes en alternatif dans les supraconducteurs, 20-22 mars. In Numelec 2000, Poitiers, France.

RAPP : Rapports de Projets

- [67] C. Dumont. développement de modèlees d'optimisation autour de la problématique des véhicules hybrides, développement de modèles de machines électriques sous cades. Technical report, IFSTTAR, 2017.
- [68] R. Derollepot and E. Vinot. Rapport d'étude promovan : Modélisation et hybridation de l'automoteur poseidon. Technical report, IFSTTAR, 2015.
- [69] R. Derollepot and E. Vinot. Rapport d'étude promovan. Technical report, IFSTTAR, 2015.
- [70] JP. Roumegoux, R. Derollepot, and E. Vinot. Définition des cycles de conduites représentatifs de véhicules aixam. Technical report, IFSTTAR, 2011.
- [71] E. Vinot. Dimensionnement des super-capacités, application aux aixam e-city. Technical report, IFSTTAR, 2010.
- [72] B. Jeanneret, E. Vinot, L. Baque, O. Bellot, and B. Malaquin. Action spécifique vehicules hybrides et dynamique des véhicules. Technical report, IFSTTAR, 2010.
- [73] JP. Roumegoux, R. Vidon, E. Vinot, and P. Tassel. Caractérisation de la voiture électrique aixam mega city e. Technical report, IFSTTAR, 2009.

- [74] E. Vinot, F. Badin, R. Vidon, B. Malaquin, P. Perret, and P. Tassel. Projet evaluation du véhicule hybride toyota prius 2004 et de ses composants. rapport final. Technical report, IFSTTAR, 2006.
- [75] E. Vinot, F. Badin, M. Montaru, R. Vidon, B. Jeanneret, and R. Trigui. Projet evalvh : Evaluation du véhicule honda insight et de ses composants en conditions d'usage. Technical report, IFSTTAR, 2005.

OV: Vulgarisation

- [76] R. Derollepot and E. Vinot. Modèles de consommation d'énergie et évaluation de l'hybridation pour des unités fluviales actuelles, projet promovan. In *Intégration du fluvial dans les villes :* Enjeux énergétiques et usages innovants. Lyon, France, november 2016.
- [77] E. Vinot, G. Donnier-Valentin, G. Meunier, and P. Tixador. Module de calcul pour supraconducteur avec flux3d, pp 13-14. In *Flux-mag N.35*. pages 13–14, june 2001.

TH : Thèses

- [78] M. Le-Guyadec. Dimensionnement multi-physique des véhicules hybrides de leurs composants et de la commande du système. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2018.
- [79] V. Reinbold. Méthodologie de dimensionnement d'un moteur électrique pour véhicules hybrides. Optimisation conjointe des composants et de la gestion d'énergie. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2014.
- [80] E. Vinot. Modélisation des supraconducteurs HTC Applications au calcul des pertes AC. These, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, april 2000.

MA : Masters

- [81] T. El-Hajji. Modeling analysis of innovative hybrid electric vehicles. Master's thesis, IFP school, 2018.
- [82] T. El-Almi. Optimisation des pentes pour l'éco-conception des routes. Master's thesis, Université de Nantes, 2018.
- [83] R. Chatterjee. Modelisation of series parallel hybrid vehicle with dual clutch transmission : Optimisation of gear ratio choice. Master's thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble -INPG, 2016.
- [84] V. Reinbold. Optimisation multicritère du véhicule hybride parallèle avec prise en compte des lois de gestion optimales. Master's thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2011.
- [85] N. Lepin. Les impacts environnementaux de la voiture électrique, nouveau véhicule, nouveaux enjeux. Master's thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble INPG, 2011.
- [86] S. Perez. Etude paramétrique de différentes architectures de véhicules hybrides thermiqueélectriques. Master's thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2010.
- [87] V.C Nguyen. Modélisation d'entrainement électrique des machines de la prius 2. Master's thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2009.

[88] E. Vinot. Modélisation des aimants permanents asynchrones synchronisés, conception d'un prototype. Master's thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1997.

BL : **Brevets et licenses logiciels**

- [89] R. Trigui, B. Jeanneret, E. Vinot, S. Pelissier, and B. Vulterescu. Dépot logiciel vehlib, iddn.fr.001.420016.000.s.p.2011.000.20600 l. 2011.
- [90] E. Vinot, R. Trigui, and B. Jeanneret. License lms imagine modele prius, premier contributeur,. 2010.
- [91] E. Vinot, G. Donnier-Valentin, G. Meunier, P. Tixador, X. Brunotte, and C. Guerin. module de calcul pour supraconducteur inséré dans flux3d (logiciel élément finis commercialisé par cedrat). 2001.

Liste des figures

1.1	Emissions de Co2 annuelles par région depuis 1751
1.2	Émissions de CO_2 annuel par habitant et pays en 2016 $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 22$
1.3	Émissions de CO_2 mondial par secteur $\ldots \ldots 23$
1.4	Pouvoir de réchauffement global mondial par secteur
1.5	Pouvoir de réchauffement global annuel en France 1990-2016
1.6	Principe architectures hybrides
1.7	Architectures hybrides moteur thermique/batterie
1.8	Les hybrides parallèles
1.9	Les hybrides séries
1.10	hybrides séries-parallèles
1.11	Hybride à dérivation de puissance type Toyota
1.12	Le dimensionnement des VEH
1.13	Le dimensionnement des véhicules hybrides
1.14	Travaux et plan du manuscrit
2.1	Les modèles pour les machines électriques
2.2	Les hybrides séries-parallèles
2.3	création de cycle pour embarcations fluviales
3.1	Gestion à base de régles
3.2	pincipe programmation dynamique
3.3	Structure outils de programmation dynamique
3.4	Hamiltonien sur cycle NEDC 50
3.5	Evolution du SoC pour λ augmentant $\ldots \ldots \ldots$
3.6	Evolution du SoC finalen fonction de λ
3.7	Comparaison PMP - DP
4.1	processus de dimensionnement optimal d'un VEH
4.2	facteurs d'échelles
4.3	Hybride série parallèle pour embarcations fluviales
4.4	Consommation hybride série parallèle
4.5	Processus de dimensionnement avec algorithme génétique et programmation dynamique 63
4.6	Comparaison de différentes architectures à dérivation de puissance 64
4.7	Comparaison de différentes architectures séries parallèle
4.8	Géométries et paramètres des machines électriques
4.9	Processus de dimensionnement avec modèle RNM des machines électriques
4.10	Evolution de la consommation en fonction du nombre de pôles
4.11	Masse des machines dans des systèmes optimaux
4.12	Comparaison cartographie modèle RNM
4.13	Géométrie des machines dans des véhicules SPHEV1 optimaux

4.14	Dimensionnement Topologie	70
5.1	Bilan encadrements	74
5.2	Principales contributions thésards et cdd	75
5.3	Bilan projets	76
5.4	Travaux et perspectives	80

Liste des tableaux

4.1	Architectures sélectionnées	60
4.2	Temps de calcul modèle machines électriques	62
4.3	Temps de calcul pour la programmation dynamique	62
4.4	Temps de calcul processus global	62