

Dimensionnement multi-physique des véhicules hybrides, de leurs composants et de la commande du système

Mathias Le Guyadec

▶ **To cite this version:**

Mathias Le Guyadec. Dimensionnement multi-physique des véhicules hybrides, de leurs composants et de la commande du système. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Grenoble Alpes, 2018. Français. NNT : . tel-01891162v1

HAL Id: tel-01891162

https://hal.science/tel-01891162v1

Submitted on 9 Oct 2018 (v1), last revised 11 Feb 2019 (v2)

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

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE LA COMMUNAUTÉ UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : **GÉNIE ÉLECTRIQUE**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Mathias LE GUYADEC

Thèse dirigée par **Laurent GERBAUD**
et co-encadrée par **Emmanuel VINOT**

préparée au sein **du Laboratoire Transports et Environnement, du Laboratoire de génie électrique de Grenoble**
et de **l'École Doctorale Électronique, Électrotechnique, Automatique, Traitement du Signal (EEATS)**

Dimensionnement multi-physique des véhicules hybrides, de leurs composants et de la commande du système

Thèse soutenue publiquement le **1er octobre 2018**,
devant le jury composé de :

M., Christophe ESPANET
Professeur des universités, Université de Franche-Comté, Besançon, Président, Rapporteur
M., Olivier BETHOUX
Professeur des universités, Sorbonne Université, GeePs, Paris, Rapporteur
M., Nicolas LABBE
Docteur ingénieur, Valéo, Examinateur
M., Xavier ROBOAM
Directeur de recherches, INP-ENSEEIHT, Laplace, Toulouse, Examinateur
M., Laurent GERBAUD
Professeur, Grenoble INP, G2Elab, Grenoble, Directeur de thèse
M., Emmanuel VINOT
Chargé de recherches, IFSTTAR, LTE, Bron, Co-encadrant de thèse

Dimensionnement multi-physique des véhicules hybrides, de leurs composants et de la commande du système.

par

Mathias LE GUYADEC

Titre

Dimensionnement multi-physique des véhicules hybrides, de leurs composants et de la commande du système.

Résumé

Le transport routier est au cœur des enjeux environnementaux actuels. Les véhicules électriques hybrides (VEH) sont une alternative intéressante, notamment en milieu urbain. Cependant, la conception de tels systèmes est complexe car la chaîne de traction (composants et architecture), la mission et la gestion énergétique du véhicule sont intimement liées.

Les travaux de V. Reinbold ont permis de mettre au point une méthodologie de dimensionnement de VEH. Les composants sont optimisés conjointement avec la gestion énergétique sur un cycle de fonctionnement afin de minimiser la consommation de carburant du véhicule. Une attention particulière est portée à la conception fine de la machine électrique via un modèle électromagnétique adapté à l'optimisation.

Dans la suite de ces travaux, nous approfondissons plusieurs aspects du dimensionnement des VEH. Tout d'abord, nous introduisons la possibilité de gérer un paramètre discret de la machine : le nombre de paires de pôles. Dans un second temps, nous développons un modèle thermique de la machine prenant notamment en compte les échanges autour des têtes de bobine. Ce modèle analytique par réseau de résistances thermiques est intégré puis utilisé dans le processus de dimensionnement par optimisation. Il a été préalablement validé via un modèle par éléments finis. Des méthodes d'analyse d'incertitude et de sensibilité sont appliquées afin de quantifier l'influence de certains paramètres thermiques. Enfin, nous appliquons la méthodologie de dimensionnement par optimisation à une architecture série/parallèle, intégrant deux machines électriques.

Mots clés

véhicule électrique hybride ; dimensionnement par optimisation ; machine synchrone à aimants permanents ; modélisation électromagnétique ; modélisation thermique ; analyse de sensibilité.

Title

Multi-physics sizing of the components and the energy management of hybrid electric vehicle systems.

Abstract

Road transportation has a huge impact on the environment. Hybrid electric vehicles (HEV) are an interesting alternative, especially for urban uses. However, HEV are complex systems to design because of the strong interaction between the component sizing, the energy management and the driving cycle.

V. Reinbold previously developed a sizing methodology for HEV. The components and the energy management are simultaneously optimized to reduce the fuel consumption of the vehicle over a driving cycle. A specific electromagnetic model is used during the optimization process to describe accurately the electrical machine.

As a continuation, we introduce firstly the possibility to deal with a discrete variable : the pole number of the electrical machine. Then, we develop a thermal model of the machine considering the convection exchanges around the end-windings. This analytical lumped parameter thermal network is used during the optimization process after being validated thanks to a finite element model. Uncertainty and sensitivity analysis are used to check the influence of some of the thermal parameters. Finally, the sizing methodology is applied to a series/parallel HEV including two electrical machines.

Keywords

hybrid electric vehicle ; optimal sizing ; permanent magnet synchronous machine ; electromagnetic model ; thermal model ; sensitivity analysis.

Table des matières

Glossaire des acronymes **11**

Glossaire des notations **13**

Introduction générale **17**

1. La mobilité au cœur des enjeux environnementaux **19**
1.1. Un constat alarmant . . . 20
1.1.1 Notre consommation d'énergie s'envole . . . 20
1.1.2 Le climat s'emballe . . . 21
1.1.3 La qualité de l'air est altérée . . . 22
1.2. Comportements et usages de demain : un challenge à relever . . . 24
1.3. L'énergie électrique dans le transport, une solution durable ? . . . 26

2. Dimensionner un véhicule hybride : un enjeu complexe **29**
2.1. Le véhicule hybride : du composant au système . . . 30
2.1.1 Composants et architectures . . . 30
2.1.2 Description du véhicule de référence . . . 33
2.1.3 Le triptyque *véhicule - mission - gestion de l'énergie* . . . 34
2.2. Optimiser un système énergétique : méthodes et outils . . . 36
2.2.1 Stratégies de conception des systèmes énergétiques . . . 36
2.2.2 Problèmes d'optimisation : définition et vocabulaire . . . 38
2.2.3 Résoudre un problème d'optimisation . . . 40
2.2.4 Modèles pour l'optimisation . . . 42
2.3. Positionnement, limites et objectifs de la thèse . . . 44
2.3.1 Choix d'une approche imbriquée . . . 44
2.3.2 L'algorithme NSGA-II pour résoudre le problème de dimensionnement . . . 45
2.3.3 La programmation dynamique pour résoudre la gestion énergétique . . . 46
2.3.4 Modélisation : focus sur la machine électrique . . . 49
2.3.5 Limites initiales et approfondissements envisagés . . . 52

3. Influence du nombre de pôles de la machine électrique **55**
3.1. Modélisation électromagnétique de la machine . . . 56

3.1.1 Description et fonctionnement des machines synchrones 56
3.1.2 Notion de paire de pôles 59
3.1.3 Présentation du modèle par réseau de réluctances 60
3.1.4 Validation par un modèle éléments finis 62
3.2. Modélisation du système 65
3.2.1 Construction d'une cartographie de rendement 65
3.2.2 Modélisation du véhicule 67
3.3. Optimisation sur cycle de fonctionnement et analyse 69
3.3.1 Optimisation d'une variable discrète par NSGA-II 69
3.3.2 Bilan quant au temps de calcul 72
3.3.3 Impact sur le dimensionnement et le fonctionnement global du véhicule . 72
3.3.4 Impact sur l'encombrement de la machine 76
3.4. Conclusion 78

4. Modélisation et influence des phénomènes thermiques dans la machine électrique 79
4.1. Phénomènes thermiques dans la machine électrique 80
4.1.1 Description du problème et enjeux 80
4.1.2 État de l'art et choix d'une approche 83
4.2. Régions complexes pour l'analyse thermique des machines 85
4.2.1 Les interfaces entre composants solides 85
4.2.2 L'écoulement autour des têtes de bobine 86
4.2.3 Les bobinages 86
4.2.4 L'entrefer 87
4.3. Construction d'un modèle de référence par éléments finis 88
4.3.1 Description de la machine 89
4.3.2 Construction du modèle 90
4.3.3 Analyse des résultats 92
4.4. Construction d'un modèle par réseau de résistances 94
4.4.1 Description théorique 95
4.4.2 Construction du réseau complet 97
4.4.3 Comparaison des modèles LPTN et FEA 102
4.4.4 Validation du modèle LPTN 102
4.5. Incertitude et sensibilité des paramètres thermiques 107
4.5.1 Paramètres étudiés et plages de variation 107
4.5.2 Méthode des plans d'expériences appliquée au modèle FEM 108
4.5.3 Analyse du modèle LPTN 110
4.6. Intégration et influence de la contrainte thermique 116

4.6.1 Méthode d'intégration et influences . . . 116
4.6.2 Impact sur le dimensionnement et le fonctionnement global . . . 118
4.7. Conclusion . . . 121

5. Application à une architecture hybride série/parallèle **123**
5.1. Contexte de l'application . . . 124
5.2. Méthode mise en œuvre . . . 126
5.3. Optimisation du véhicule sur cycle NEDC . . . 127
5.3.1 Paramètres et données utilisées . . . 127
5.3.2 Performances globales des véhicules . . . 128
5.3.3 Dimensionnement et fonctionnement des machines : cas du modèle fin . . . 129
5.4. Conclusion et perspectives . . . 130

Conclusion générale et perspectives **133**

Bibliographie **139**

Annexes **149**

A. L'algorithme NSGA-II **151**
A.1. Fonctionnement général et vocabulaire . . . 151
A.2. Mécanismes et réglages de l'algorithme . . . 152
A.2.1 Initialisation d'une population . . . 152
A.2.2 Évaluation et tri . . . 152
A.2.3 Sélection . . . 154
A.2.4 Évolution . . . 154

B. Données du véhicule hybride de référence **157**

C. Outils pour l'import du modèle RNM sous Matlab **159**

D. Validation du calcul des pertes fer **161**

Liste des figures **163**

Liste des tableaux **165**

Glossaire des acronymes

2D En 2 dimensions

3D En 3 dimensions

AC/DC : *Alternating current* (courant alternatif) / *direct current* (courant continu)

ACM Association convertisseur machine

BATT Batterie électrique

BV Boîte de vitesses

CFD *Computational fluid dynamics*

CONV Convertisseur électrique statique

COP21 Conférence de Paris de 2015 sur le climat ($21^{ème}$ conférence des parties)

CPL Coupleur mécanique

EMB Embrayage

EnR Énergies renouvelables

EPA *Environmental protection agency*

FEA *Finite element analysis*

FEM *Finite element model*, modèle par éléments finis

G2Elab Laboratoire de génie électrique de Grenoble

GIEC Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

GES Gaz à effet de serre

IFSTTAR Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux

IGBT *Insulated Gate Bipolar Transistor*

Li-ion Lithium ion (technologie de batteries)

LP *Linear programming*

LPTN *Lumped parameter thermal network*, modèle par réseau de résistances thermiques

LTE Laboratoire transports et environnement

MAS Machine asynchrone

ME Machine électrique

MINLP *Mixed integer non-linear programming*

MLI Modulation de largeur d'impulsion

MSAP Machine synchrone à aimants permanents

MT Moteur thermique

MUSE Modèle unifié pour les dispositifs et systèmes énergétiques

NEDC *New european driving cycle*

NiMH Nickel Métal-Hydrure (technologie de batteries)

NLP *Non-linear programming*

NSGA *Non-dominated sorting genetic algorithm*

OMS Organisation mondiale de la santé

PC *Personal computer*

PM *Particulate matter*, particules fines

PRG Potentiel de réchauffement global

QP *Quadratic programming*

RAM *Random access memory*

RED Réducteur de vitesse

RES Réservoir de carburant

RNM *Reluctance network model*, modèle par réseau de réluctances

SQP *Sequential quadratic programming*

TEFC *Totally enclosed fan-cooled* (type de machine électrique)

THS *Toyota hybrid system*

TVA Taxe sur la valeur ajoutée

VE Véhicule électrique

VEH Véhicule électrique hybride

VHR Véhicule hybride rechargeable

V2G *Vehicle to grid*, "du véhicule au réseau"

WLTC *Worldwide harmonized light vehicles test cycle*

Glossaire des notations

Notation	*Grandeur*	unité
	concernant la batterie	
I_{bat}	*courant du pack de batteries*	A
N_{bat}	*nombre de modules (en série)*	$s.u$
SoC	*état de charge*	$\%$
U_{bat}	*tension du pack de batteries*	V
	concernant le convertisseur statique	
U_{bus}	*tension du bus continu*	V
f	*fréquence des courants (côté AC)*	s^{-1}
	concernant la machine électrique	
	- géométrie -	
α	*inclinaison des aimants du rotor*	rad
GAP	*épaisseur d'entrefer*	mm
$H3S$	*longueur des encoche*	mm
$H4S$	*épaisseur de la culasse*	mm
LM	*longueur des aimants*	mm
$MAGWID$	*épaisseur des aimants*	mm
pp	*nombre de paires de pôles*	$s.u$
p	*nombre de pôles*	$s.u$
$PROF$	*profondeur de la machine*	mm
$RAD1$	*rayon du rotor*	mm
R_{ext}	*rayon extérieur de la machine*	mm
RHQ	*position de l'aimant*	mm
$W3S$	*largeur d'une encoche*	mm
	- phénomènes électromécaniques -	
C_{em}	*couple électromagnétique*	$N \cdot m$
F_1, F_7	*flux magnétiques*	Wb
$\underline{I(t)}$	*champ magnétique d'induit*	T
P_f	*pertes fer*	W
P_j	*pertes par effet Joule*	W

P_m	*pertes mécaniques*	W
P_{me}^{meca}	*puissance mécanique maximale*	kW
R_s	*résistance d'une phase au stator*	Ω
θ_m	*position mécanique du rotor*	rad
Φ_d	*flux inducteur vu par une phase*	Wb
ψ	*angle d'autopilotage de la machine*	rad
ϕ	*phase du courant de la phase A pour t=0*	rad
Ω_{ME}	*vitesse de rotation de la machine*	$rad \cdot s^{-1}$
Ω_b	*vitesse de base de la machine*	$tr \cdot min^{-1}$
ω_s	*pulsation électrique des courants au stator*	$rad.s^{-1}$
	- phénomènes thermiques -	
e	*épaisseur*	m
e_{ctc}	*... du contact stator/carter*	m
e_{eq}	*... de la couche mince équivalente à la convection*	m
e_{slins}	*... de l'isolant d'encoche*	m
h	*coefficient de convection*	$W \cdot m^{-2} \cdot ℃^{-1}$
h_{cas}	*... naturelle autour du carter*	$W \cdot m^{-2} \cdot ℃^{-1}$
h_{oil}	*... du mélange air-huile*	$W \cdot m^{-2} \cdot ℃^{-1}$
P_1	*puissance thermique échangée entre les encoches et le reste du stator*	W
P_{11}	*puissance thermique échangée entre les têtes de bobines et encoche ext.*	W
Rcd, plp	*résistance de conduction (parallélépipède)*	$℃ \cdot W^{-1}$
Rcd, cyl	*résistance de conduction (cylindre)*	$℃ \cdot W^{-1}$
Rcv	*résistance de convection (surface)*	$℃ \cdot W^{-1}$
S	*section*	m^2
T	*température*	℃
T_{cas}	*... du carter*	℃
T_{end}	*... des têtes de bobines*	℃
T_{min}	*... minimale*	℃
T_{max}	*... maximale*	℃
T_{oil}	*... du mélange air-huile*	℃
T_{rotor}	*... du rotor*	℃
T_{slot}	*... des encoches (stator)*	℃
T_{tooth}	*... des dents (stator)*	℃
T_∞	*... autour du carter (condition limite)*	℃

λ	*coefficient de conduction*	$W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$
λ_{ax}	*... dans la culasse et les dents (axial)*	$W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$
λ_{cas}	*... dans le carter*	$W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$
λ_{ctc}	*... du contact stator/carter*	$W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$
λ_{end}	*... dans la tête de bobine (FEA)*	$W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$
λ_{eq}	*... dans la couche mince équivalente à la convection*	$W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$
λ_{gap}	*... dans l'entrefer*	$W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$
λ_{impr}	*... dans l'isolant d'imprégnation*	$W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$
λ_{oil}	*... dans la cavité air-huile*	$W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$
λ_{PM}	*... dans les aimants*	$W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$
λ_{rad}	*... dans la culasse et les dents (radial)*	$W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$
λ_{slax}	*... dans l'encoche (axial)*	$W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$
λ_{slins}	*... dans l'isolant d'encoche*	$W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$
λ_{slrad}	*... dans l'encoche (radial)*	$W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$
λ_{tete}	*... dans la tête de bobine (LPTN)*	$W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$
Φ_{cond}	*flux thermique par conduction*	W
Φ_{conv}	*flux thermique par convection*	W
	concernant le moteur thermique	
CSP	*consommation spécifique du moteur*	$g/(kW.h^{-1})$
P_{mt}	*puissance maximale du moteur*	kW
	concernant les réducteurs de vitesse	
η_{bv}	*rendement de la boîte de vitesses*	%
η_{cpl}	*rendement du coupleur*	%
η_{red}	*rendement du réducteur final*	%
k_{bv}	*rapports de la boîte de vitesses*	$s.u$
k_{cpl}	*rapport de réduction du coupleur*	$s.u$
k_{red}	*rapport de réduction du réducteur*	$s.u$
	concernant le système	
F_{res}	*force de résistance à l'avancement*	N
J_1	*consommation de carburant sur une mission*	$l/100\ km$
P_{acm}	*puissance de l'ACM*	kW
P_r	*puissance demandée à la roue*	kW
t	*temps*	s
t_{0-100}	*temps d'accélération de 0 à 100 $km.h^{-1}$*	s
t_{80-120}	*temps d'accélération de 80 à 120 $km.h^{-1}$*	s
U_1	*mode de propulsion*	$s.u$

V	*vitesse du véhicule*	$m \cdot s^{-1}$
V_{max}	*vitesse maximale du véhicule*	$km \cdot h^{-1}$
α_1	*coefficient 1 loi de route*	N
α_2	*coefficient 2 loi de route*	$N \cdot s \cdot m^{-1}$
α_3	*coefficient 3 loi de route*	$N \cdot s^2 \cdot m^{-2}$
$\mathbb{X}_{vh}$	*variables relatives au véhicule hybride*	
$\mathbb{X}_{me}$	*variables relatives à la machine électrique*	
	concernant les algorithmes	
mu	*paramètre de réglage (croisement)*	$s.u$
mum	*paramètre de réglage (mutation)*	$s.u$
N_{ind}	*taille de la population*	$s.u$
N_{gen}	*nombre de générations*	$s.u$
$pool$	*taille de la population de parents*	$s.u$
$tour$	*taille du tournoi de sélection*	$s.u$
τ_m	*taux de mutation*	%
τ_x	*taux de croisement*	%
	concernant l'analyse statistique	
N	*nombre d'échantillons*	$s.u$
S_i	*indice de Sobol de* 1^{er} *ordre*	$s.u$
$Sign.$	*effet statistiquement significatif*	$s.u$
S_{Ti}	*indice de Sobol total*	$s.u$
μ	*espérance*	
σ	*écart type*	

Introduction générale

On peut facilement s'interroger sur la durabilité de nos modes de vie occidentaux. Profitant des développements technologiques du siècle dernier et de la libéralisation des échanges, les flux de personnes et de marchandises n'ont jamais été aussi importants. Cette mobilité, qu'elle soit à petite ou à grande échelle, a des impacts considérables sur notre environnement et notre santé. Comme nous le verrons dans le chapitre 1, le transport individuel tel que nous le connaissons aujourd'hui est vorace en énergie (issue principalement de sources non-renouvelables). Il participe au phénomène de réchauffement climatique et à la dégradation de la qualité de l'air dans nos villes.

En ciblant nos besoins (sobriété), puis en améliorant l'efficacité des modes de transports qui permettent de les réaliser, nous pourront alors réduire l'impact de nos déplacements. Actuellement, l'énergie électrique fait son apparition dans les solutions de mobilité car elle permet notamment d'accroitre l'efficacité énergétique des véhicules en ville. Le véhicule électrique hybride (VEH) est une alternative intéressante :

— il présente une autonomie identique à un véhicule conventionnel ;

— la consommation, la pollution et le bruit sont réduits grâce au mode électrique ;

— il est caractérisé par un bon confort de conduite.

Toutefois, ces gains sont obtenus au prix d'une complexification importante du véhicule. Les sources d'énergie et les mécanismes de transmission sont multipliés, et le système doit être contrôlé par un outil de gestion énergétique spécifique. Comme nous le verrons dans le chapitre 2, la conception d'un VEH nécessite de considérer en même temps les composants de la chaîne de traction, la mission du véhicule et sa gestion énergétique.

Lors de précédents travaux [1], Vincent Reinbold a mis au point une méthodologie de conception d'une chaîne de traction pour véhicule hybride, dans l'optique de réduire la consommation de carburant lors d'une mission. Il en résulte un processus d'optimisation permettant de dimensionner avec finesse la machine électrique dans un système VEH régit par de fortes interactions (autres composants de la chaine de traction, mission, gestion de l'énergie). Cette solution nous permet d'entrevoir de nombreux approfondissements qui sont l'objet de ce travail de thèse.

V. Reinbold a développé un modèle électromagnétique de la machine électrique. Dans le chapitre 3, nous nous intéresserons à la prise en compte d'une variable de dimensionnement supplémentaire : le nombre de pôles de la machine électrique. Comment considérer une telle variable discrète dans le processus d'optimisation, qui pour l'instant, ne traite que des variables continues pour le dimensionnement ? Quelle incidence aura cette variable sur le dimensionnement et le fonctionnement de la machine électrique en particulier, et du véhicule en général ?

Ensuite, au chapitre 4, nous aborderons le difficile problème de la modélisation thermique des machines électriques. En fonctionnement, les échauffements dans la machine peuvent être limitant, voire destructeurs. Le dimensionnement et la commande de la machine y sont donc intimement liés. Dans ce cadre, nous nous interrogerons sur les phénomènes thermiques à considérer, sur le type de modèle(s) à utiliser pour une utilisation en optimisation et sur la prise en compte du modèle retenu dans le processus de dimensionnement par optimisation.

Dans la suite du chapitre 4, nous présenterons une analyse de la sensibilité de certains paramètres thermiques de la machine. En effet, plusieurs paramètres sont difficiles à définir avec précision et certitude car ils dépendent des matériaux utilisés, des procédés de fabrication, ou encore de la géométrie de la machine. Quelle est alors la conséquence d'une telle incertitude sur les températures dans la machine ? Quels sont les paramètres les plus influents ?

Finalement, nous appliquerons la méthodologie de dimensionnement avec ses nouvelles fonctionnalités à des véhicules hybrides intégrant plusieurs machines électriques (exemple de l'architecture série/parallèle). Des premiers résultats seront présentés dans le chapitre 5.

CHAPITRE 1

La mobilité au cœur des enjeux environnementaux

Contenu

1.1. Un constat alarmant 20
1.1.1 Notre consommation d'énergie s'envole 20
1.1.2 Le climat s'emballe 21
1.1.3 La qualité de l'air est altérée 22
1.2. Comportements et usages de demain : un challenge à relever . 24
1.3. L'énergie électrique dans le transport, une solution durable ? . 26

1.1. Un constat alarmant

Le réchauffement climatique, la déforestation massive ou encore l'augmentation de la quantité de déchets sont aujourd'hui sans conteste des indicateurs de l'impact croissant de l'humanité sur notre environnement. Nos modes de vie actuels sont loin d'être durables, et sont la principale cause de ces changements environnementaux. Le déplacement de personnes et de marchandises est un élément essentiel du fonctionnement de notre société. La mondialisation, les infrastructures de transport et le développement des moyens de communication et d'information permettent en effet des flux au niveau planétaire. Nous consommons des produits fabriqués ou plantés sur d'autres continents. Nos villes s'étendent et chaque jour des millions de personnes se déplacent depuis leur domicile jusqu'à leur travail. Nous préférons jeter et racheter plutôt que de réparer et réutiliser. Il faut repenser nos modes de vie afin que les générations futures puissent avoir des conditions de vie convenables.

1.1.1. Notre consommation d'énergie s'envole

Nos modes de vie actuels sont voraces en énergie et en ressources. Durant les dernières décennies, la consommation mondiale d'énergie (tout comme la population) n'a cessé d'augmenter, et a même doublé entre 1973 et 2015 [2]. Les pays les plus développés sont également les plus gros consommateurs d'énergie par rapport à leur population. Mais notre planète est un espace fini contenant une quantité limitée de ressources. Notre modèle de société doit évoluer afin de minimiser notre dépendance aux ressources non-renouvelables ainsi que notre impact sur l'environnement tout en garantissant la satisfaction de nos besoins fondamentaux.

Comme le montre la figure 1.1, le secteur des transports est l'un des plus énergivore en France. Il apparaît clairement comme le principal utilisateur des produits pétroliers, ce qui n'est pas sans conséquence sur notre environnement. Représentant plus de 30 % de la consommation finale totale d'énergie en France en 2015, c'est un secteur qui, dans notre pays et bien d'autres, doit subir des transformations. En effet tout énergie a un coût, qu'il soit financier ou écologique.

L'unité mégatonne équivalent pétrole ($Mtep$) utilisée sur la figure 1.1, correspond à 41,868 PJ, soit l'équivalent du pouvoir calorifique d'une tonne de pétrole. Elle permet la comparaison entre différentes formes d'énergie en fonction de leur contenu énergétique. La consommation finale d'énergie représente la consommation des ménages et des entreprises autres que celles du secteur de la transformation d'énergie. Notons que les énergies renouvelables productrices d'électricité (hydraulique, éolien et solaire) apparaissent dans la catégorie "électricité". Seules les énergies renouvelables à vocation thermique (bois-énergie,

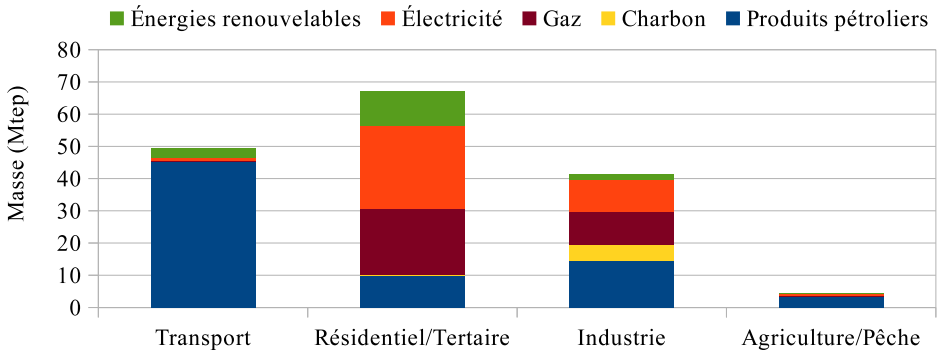


Figure 1.1. Consommation finale d'énergie par secteur selon la source d'énergie, en mégatonne équivalent pétrole (Mtep), en France (2015) [3].

résidus agricoles et alimentaires, déchets urbains renouvelables, solaire thermique, pompes à chaleur (PAC), biogaz, biocarburants, etc) sont présentées dans la catégorie du même nom.

1.1.2. Le climat s'emballe

En 2014, le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) affirme dans son $5^{ème}$ rapport d'évaluation [4] que le lien entre les activités humaines et l'accroissement des températures constaté depuis 1950 est extrêmement probable. L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES), notamment due à une forte croissance économique et démographique, en serait la cause principale. L'incidence sur les écosystèmes est de grande ampleur sur l'ensemble de notre planète. Cependant, ce constat n'est pas une fatalité, et les projections varient selon les développements économiques ainsi que les politiques climatiques qui seront choisies. Une augmentation de 2 °C d'ici 2100 par rapport à la température moyenne observée pendant la période pré-industrielle (objectif fixé lors de la COP21 en 2015 à Paris) est souvent présentée comme limite. Néanmoins, il devient urgent d'agir : 2017 se classe comme la seconde année la plus chaude juste après 2016, et ce depuis le début des relevés en 1880 [5, 6]. L'anomalie observée a été de +1,13 °C en moyenne par rapport à la période pré-industrielle (1880-1899).

Le secteur des transports se positionne comme l'un des principaux émetteurs de GES. Au niveau mondial, il représente environ 15 % de ces émissions [4]. Il arrive derrière la production d'électricité et de chaleur (25 %), l'agriculture (24 %) et l'industrie (21 %). Le dioxyde de carbone (CO_2) représente plus de 75% de la quantité de GES émis par les activités humaines. C'est notamment l'utilisation de combustibles fossiles comme le charbon ou le pétrole qui en est à l'origine. En France, en 2015, le transport routier représente 37 % des émissions de CO_2 atmosphérique [7]. Les véhicules particuliers en sont les principaux contributeurs. Lorsque l'on mesure le potentiel de réchauffement global, indi-

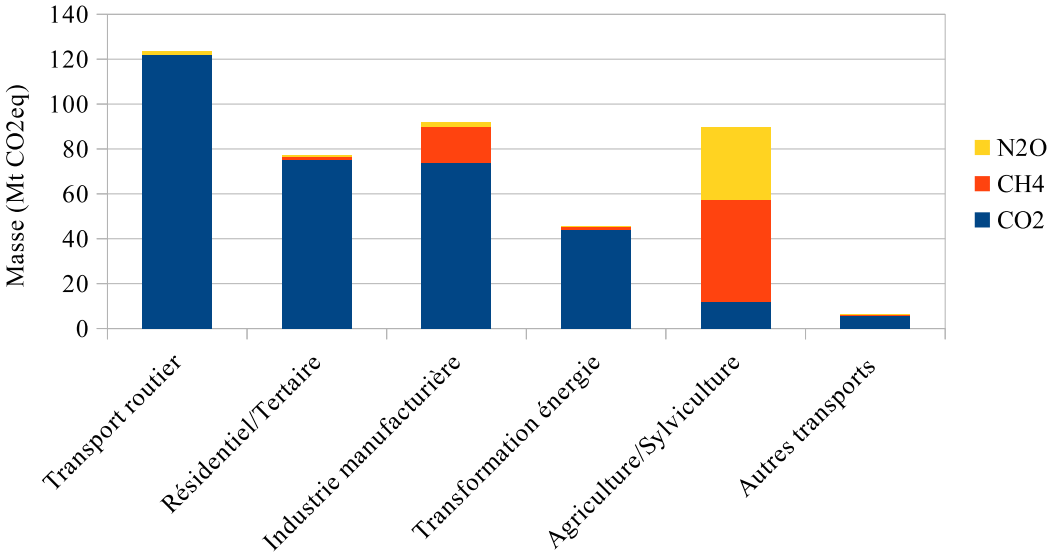


Figure 1.2. Émissions des principaux GES par secteur en France (2015) [7].

cateur regroupant les effets cumulés de l'ensemble des gaz contribuant à l'accroissement de l'effet de serre, le constat est identique. En effet, le secteur des transports arrive en première position avec 28 % des émissions, comme illustré sur la figure 1.2.

L'unité utilisée est la Mégatonne (Mt) de CO_2eq. On associe à chaque gaz un indice représentant son potentiel de réchauffement global sur 100 ans (PRG en français et GWP100 en anglais pour *100 years global potential warming*) par rapport au CO_2. Les valeurs utilisées sont 28 pour le CH_4 et 265 pour le N_2O [4].

1.1.3. La qualité de l'air est altérée

L'organisme mondial de la santé (OMS) estime qu'en 2012 environ 7 millions de décès ont été causés par la pollution de l'air (intérieure et extérieure) dans le monde [8]. Cela représente 1 décès sur 8, ce qui en fait le premier risque environnemental pour la santé. En France, on parle d'environ 48 000 décès chaque année [9]. 92% de la population mondiale vit dans un lieu où la qualité de l'air est en deçà des recommandations de l'OMS. Il faut noter que les pics de pollution n'ont qu'un effet marginal sur la santé vis-à-vis d'une exposition quotidienne.

La part de chaque secteur dans l'émission des polluants les plus dangereux pour la santé selon l'OMS est présenté sur la figure 1.3. Les véhicules diesel sont les principaux émetteurs de NO_x, notamment les véhicules particuliers (24% des émissions totales de NO_x). Le dioxyde de souffre (SO_2) est essentiellement émis par les procédés industriels de raffinage du pétrole (20% des émissions totales de SO_2) et peut ainsi en partie être considéré comme émis indirectement par l'utilisation de véhicules thermiques. Les parti-

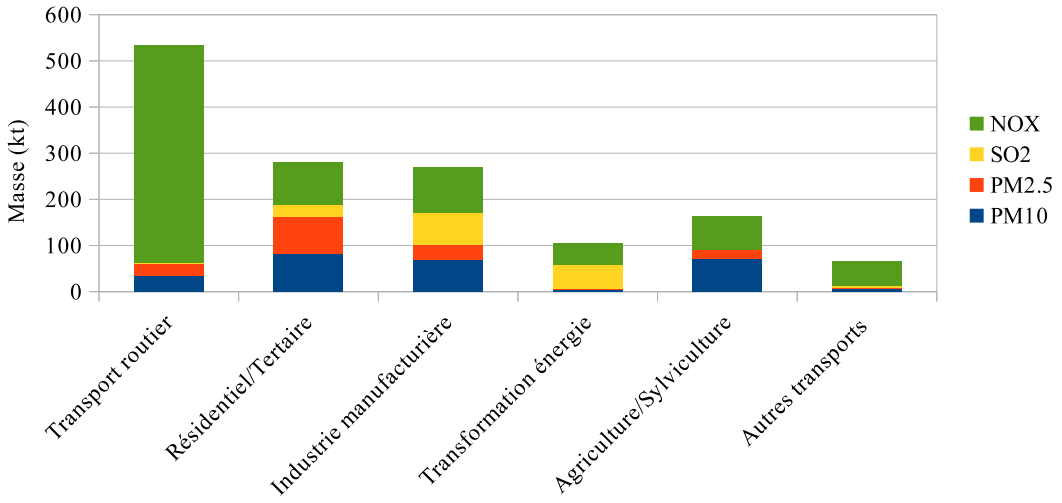


Figure 1.3. Émissions des principaux polluants atmosphériques par secteur, en kt, en France (2015). Les oxydes d'azote (NO_x, dont NO_2) sont très toxiques et à l'origine de l'ozone troposhérique, qui cause le "smog". Le dioxyde de souffre (SO_2) et les particules fines (PM) sont les autres polluants considérés.

cules (PM) sont quant à elles principalement émises par les phénomènes de combustion (dont le chauffage résidentiel) et l'agriculture.

Aujourd'hui, les normes antipollution poussent le moteur thermique dans ses retranchements. En 2015, l'agence américaine de protection de l'environnement (EPA) révèle l'affaire Volkswagen, dite "dieselgate" [10]. Le constructeur aurait utilisé différentes techniques afin de réduire frauduleusement les émissions de NO_x de certains de ses véhicules essence et diesel, afin qu'ils puissent passer les tests d'homologation. Mais en conditions réelles, le système de dé-pollution est désactivé, ce qui permet au constructeur d'afficher une consommation de carburant relativement basse pour ces modèles. Les émissions de NO_x dépassent alors largement les normes . . .

Tel que nous le connaissons aujourd'hui, le transport de personnes et de marchandises n'est pas durable. Comme présenté par les exemples précédents, nos modes de vie, de consommation et donc de déplacement ont un impact trop important sur notre environnement. Le transport routier est, en France notamment, le contributeur principal aux phénomènes de réchauffement climatique (émissions de CO_2) et de pollution de l'air (émissions de NO_x). Il se caractérise par une forte demande en terme d'énergie, notamment fossile, et dont les réserves s'amenuisent. Le changement de nos comportements est donc inévitable. Quelles pourraient être les solutions à mettre en place ?

1.2. Comportements et usages de demain : un challenge à relever

Ce paragraphe nous permet de mettre en avant une approche qui a du sens selon nous : le scénario négaWatt [11], imaginé par l'association d'experts du même nom. Il s'agit d'une proposition de démarche afin de réussir la transition énergétique en France entre 2017 et 2050. Elle se base sur trois principes fondamentaux, ordonnés comme suit :

— la sobriété : en premier lieu, il s'agit de prioriser nos besoins en énergie (et donc par exemple éteindre les vitrines et les bureaux inoccupés la nuit, contenir l'étalement urbain, réduire les emballages, etc.) ;

— l'efficacité énergétique : dans un second temps, il s'agit de diminuer la quantité d'énergie nécessaire à la satisfaction des besoins considérés comme prioritaires (isoler les bâtiments, améliorer le rendement des appareils électriques ou des véhicules, etc.) ;

— les énergies renouvelables (EnR) : finalement, nous devons produire de l'énergie pour satisfaire ces besoins. Il faudrait privilégier les EnR pour leur faible impact sur l'environnement et leur caractère inépuisable (contrairement aux énergies fondées sur des réserves finies comme le charbon, le pétrole, le gaz fossile et l'uranium).

Afin de réduire la consommation d'énergie du secteur des transports, et en particulier de la mobilité des personnes, voici ce que préconise le scénario :

— concernant la sobriété :
  → abaisser les vitesses réglementaires sur route et autoroute ;
  → reporter nos déplacements en voiture et avion vers les transports en commun et les modes actifs (vélo, marche) ;
  → diminuer les distances parcourues, par exemple en facilitant le télétravail ;
  → développer le covoiturage.

— concernant l'efficacité énergétique :
  → basculer vers le gaz (75%) et l'électricité (25%) d'origine renouvelable (abandon du pétrole).

En résumé, concernant les autres secteurs, il s'agirait de favoriser la rénovation énergétique performante (bâtiment), de fabriquer des produits plus durables et réparables (industrie) et de basculer vers de nouvelles pratiques agricoles et habitudes alimentaires (agriculture). L'ensemble des mesures proposées pourraient avoir, selon négaWatt, des

impacts socio-économiques et environnementaux forts. Elles permettraient un avenir énergétique soutenable, basé sur un production 100% renouvelable (biomasse, biogaz, éolien, photovoltaïque).

Ces changements pourront avoir lieu dans le cadre d'une modification de nos comportements ainsi que de la mise en place de politiques publiques fortes. Notamment, la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte a été publiée au Journal Officiel en août 2015 [12]. Elle met à la disposition des citoyens, entreprises et territoires des outils pour agir concrètement. La loi fixe des objectifs ambitieux aux horizons 2020 et jusqu'à 2050 concernant l'énergie (consommation, mix énergétique), la pollution (GES, déchets) et l'habitat (précarité et performance énergétique). Les mesures clés pour le secteur des transports se concentrent autour du développement du "transport propre" via notamment :

— un objectif de 7 millions de points de recharge pour les voitures électriques en 2030 ;
— le renouvellement des flottes publiques par une proportion minimale de véhicules à faibles émissions ;
— des mesures de restriction de la circulation dans les zones affectées par une mauvaise qualité de l'air.

Certains pays font figures de précurseurs dans l'encadrement du "transport propre", comme la Norvège par exemple [13]. La voiture électrique y représente 5,8 % des ventes en 2013, ce qui est largement inégalé à travers le monde. Dans le même temps, 96 % de l'électricité norvégienne est produite à partir de ressources renouvelables, ce qui donne réellement sens à ce choix de transport. C'est la combinaison de plusieurs facteurs qui a permis cette orientation vers le véhicule électrique :

— des objectifs climatiques nationaux ambitieux :
  ➞ atteindre la neutralité carbone en 2050 ;
  ➞ vendre des véhicules consommant (en moyenne) moins de 85 gCO_2/km dès 2020.
— des incitations pour la société, notamment :
  ➞ exemption de TVA sur ces véhicules ;
  ➞ taxe à l'achat d'un véhicule thermique (basé sur la puissance du moteur, le poids du véhicule et les émissions de CO_2 et de NO_x).
  ➞ gratuité des routes à péage ;
  ➞ accès aux lignes de bus ;

— un effet “boule de neige” engendré par une communication efficace et un partage d’expériences de la part des utilisateurs.

En résumé, les mesures norvégiennes ont permis de rendre le véhicule électrique plus accessible et compétitif. Ce succès résulte d’évènements simultanés : des incitations sociétales et la mise à disposition sur le marché d’offres attractives. Notons que le système de taxation à l’achat d’un véhicule thermique s’est révélé plus efficace que la taxation des carburants.

Envisagée par les associations et les politiques, la mobilité électrique semble être en mesure de se faire une place dans notre société. Les constructeurs automobile ont d’ailleurs déjà saisi le coche avec un fleurissement d’offres pour les années à venir [14].

Cependant, nous soulignons que le transport individuel en voiture est une aberration énergétique, surtout en ville où des alternatives existent. En effet, il s’agit souvent de déplacer un véhicule pesant plus d’une tonne pour transporter une seule personne. Nous rappelons ici que la meilleure manière de réduire son impact environnemental lors de ses déplacements, c’est de faire preuve de sobriété ! Notamment, en remplacement de la voiture, nous devrions privilégier les transports en commun et les modes actifs comme la marche et le vélo, qui en plus d’être meilleurs pour la santé [15], permettent souvent de se déplacer plus vite. Par exemple, pour un trajet court en milieu urbain, la vitesse moyenne d’un vélo est de 15 $km.h^{-1}$, contre 14 $km.h^{-1}$ pour une voiture d’après [16].

Si la sobriété énergétique est le premier pas vers le transport durable, l’efficacité des modes de transports est le second. Dans cette optique, les véhicules électrifiés semblent avoir de beaux jours devant eux, notamment pour des utilisations urbaines. Mais attention, certaines limites existent et sont abordées dans la partie suivante.

1.3. L’énergie électrique dans le transport particulier, une solution durable ?

L’énergie électrique apparaît de différentes manières dans les solutions de mobilité. Si l’on considère les véhicules particuliers, on peut faire état de 3 catégories, décrites dans le tableau 1.1, faisant intervenir différemment l’énergie électrique :

— le véhicule électrique (VE) ;

— le véhicule hybride rechargeable (VHR) ;

— le véhicule électrique hybride (VEH).

Tableau 1.1. Les catégories de véhicules embarquant une propulsion électrique, et leurs atouts et inconvénients par rapport à un véhicule conventionnel.

	VE	VHR	VEH
Type d'énergie	électrique	électrique et thermique	électrique et thermique
Recharge sur le réseau électrique	oui	oui	non
Nombre d'immatriculations en France en 2017 [1]	30 921	10 803	69 680
pollution locale	réduite[2]	réduite en mode électrique	réduite en mode électrique
pollution pour générer l'énergie	selon mix énergétique	oui et selon mix énergétique	oui
bruit	réduit	réduit en mode électrique	réduit en mode électrique
autonomie	réduite (centaine(s) de km)	conventionnelle (dont dizaines de km en tout électrique)	conventionnelle (dont quelques km en tout électrique)
batteries	dizaines de kWh	dizaine de kWh	quelques kWh

1. [17, 18]
2. Les émissions à l'échappement sont nulles mais pas celles hors échappement (abrasion des pneus et des freins, usure de la chaussée, resuspension). En moyenne, les émissions hors échappement peuvent représenter 50% des émissions totales de PM_{10}.

On qualifie souvent la voiture électrique de "véhicule propre". Mais l'est-elle vraiment ? L'intérêt principal des systèmes électriques est leur réversibilité. Ainsi, l'énergie peut transiter de la batterie vers les roues, et inversement, ce qui permet par exemple de récupérer l'énergie lors d'une décélération. De plus, le rendement énergétique d'une chaîne de traction électrique (batterie, convertisseur, machine électrique), de l'ordre de 85 à 90 %, est très supérieur à celui d'une chaîne conventionnelle (moteur thermique, embrayage, rapport de réduction) qui se situe autour de 30%. Néanmoins, malgré ses atouts (réduction du bruit et de la pollution locale), la propulsion électrique amène un certain nombre de réflexions [19].

— L'impact environnemental des véhicules rechargeables (VE, VHR) dépend du mix énergétique servant à produire l'électricité. Si ce sont des sources non-renouvelables qui sont utilisées, alors les émissions de polluants et de GES sont justes déplacées des villes vers les sites de production et de transformation de l'énergie. L'utilisation d'un tel véhicule aura du sens si l'électricité est produite à partir de sources renouvelables ;

— Toujours concernant les véhicules rechargeables, la question de la mise en place des infrastructures de recharge se pose : quel modèle économique ? Comment les dispose-t-on ? Recharge lente ou rapide ? La problématique de la gestion des flux d'énergie avec le réseau électrique apparaît également (usage en *vehicle-to-grid* (V2G)) ;

— Enfin, et ce pour tous les véhicules utilisant le vecteur électrique, quel est l'impact environnemental sur le cycle de vie ? On parle notamment du problème des batteries (métaux rares, vieillissement à l'usage, recyclage/seconde vie) et de l'extraction des terres rares pour les aimants des machines électriques [20].

À la vue des points forts et faibles de chacune de ces solutions pour la mobilité électrique, il semble que le véhicule hybride soit une alternative intéressante à court et moyen terme. Tout en conservant l'autonomie d'un véhicule conventionnel, il profite de la réversibilité et du rendement d'une chaîne de traction électrique afin de réduire consommation et pollution lors d'usages de type urbain. Enfin, le confort de conduite est intéressant dans ces situations car le mode électrique bénéficie d'un couple à vitesse nulle et de l'absence d'embrayage.

Les véhicules électriques hybrides disposent d'une efficacité énergétique accrue vis-à-vis des véhicules conventionnels, notamment lors d'une utilisation urbaine. Toutefois, ce gain est obtenu par une complexification du système : multiplicité des sources d'énergie, gestion énergétique embarquée, etc. Notre travail a pour objectif de poursuivre le développement d'une méthodologie de dimensionnement d'une chaîne de traction pour un VEH. Nous nous intéresserons en particulier à la conception de la machine électrique dans ce système, et donc aux modèles physiques permettant de décrire son fonctionnement. Le chapitre suivant positionne le problème de la conception par optimisation d'un véhicule électrique hybride ainsi que la solution mise en place par Vincent Reinbold dans des travaux précédents [1]. Nous présenterons finalement nos objectifs pour cette thèse.

CHAPITRE 2

Dimensionner un véhicule hybride : un enjeu complexe

Contenu

2.1. Le véhicule hybride : du composant au système 30
2.1.1 Composants et architectures 30
2.1.2 Description du véhicule de référence 33
2.1.3 Le triptyque *véhicule - mission - gestion de l'énergie* 34
2.2. Optimiser un système énergétique : méthodes et outils 36
2.2.1 Stratégies de conception des systèmes énergétiques 36
2.2.2 Problèmes d'optimisation : définition et vocabulaire 38
2.2.3 Résoudre un problème d'optimisation 40
2.2.4 Modèles pour l'optimisation 42
2.3. Positionnement, limites et objectifs de la thèse 44
2.3.1 Choix d'une approche imbriquée 44
2.3.2 L'algorithme NSGA-II pour résoudre le problème de dimensionnement 45
2.3.3 La programmation dynamique pour résoudre la gestion énergétique . 46
2.3.4 Modélisation : focus sur la machine électrique 49
2.3.5 Limites initiales et approfondissements envisagés 52

Dans ce chapitre, nous présentons notre approche de la conception d'une chaîne de traction pour un véhicule hybride, avec un focus sur la machine électrique. Nous verrons qu'outre les composants embarqués dans le véhicule, leur agencement ainsi que la gestion énergétique et la mission du VEH sont des éléments indissociables dans cette optique. Nous présenterons la méthodologie explorée dans les travaux de thèse de Vincent Reinbold [1], et finalement, nos objectifs quant à l'approfondissement de celle-ci au vu de ses limites actuelles.

2.1. Le véhicule hybride : du composant au système

2.1.1. Composants et architectures

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les VEH sont une piste crédible pour réduire notre impact environnemental dans le cadre du remplacement d'un véhicule conventionnel. Un véhicule électrique hybride est avant tout un assemblage de composants permettant de convertir l'énergie stockée dans différentes sources en un mouvement. On peut regrouper ces composants en plusieurs catégories :

— les sources d'énergie (réservoir de carburant et batterie) ;

— les composants de conversion de l'énergie (moteur thermique, convertisseur statique et machine électrique) ;

— les éléments de transmission mécanique (embrayage, rapport de réduction, boîte de vitesses).

Dans notre cas, nous considérerons donc un véhicule avec deux sources : le carburant et la batterie. C'est une solution classique actuellement commercialisée. Mais le stockage de l'énergie peut également prendre d'autres formes [21, 22] : pile à combustible, supercondensateur, etc.

Il existe un grand nombre de façons d'agencer les composants entre eux [23, 24], ce que l'on appelle architecture de la chaine de propulsion du véhicule. Voici les principales catégories recensées dans la littérature :

— les architectures de type hybride parallèle sont simples et efficaces [25]. La figure 2.1 en est un exemple. Il s'agit de coupler une chaîne de traction électrique à une chaîne conventionnelle. Les déclinaisons sont multiples en jouant sur le nombre et la position des organes de transmission mécanique. Néanmoins, le fonctionnement

du moteur ne peut pas être toujours optimal car sa vitesse est imposée par celle des roues, par l'état des embrayages et les rapports de réduction. Sont incluses également dans cette catégorie les architectures dîtes « parallèles par la route » où l'action des motorisations thermique et électrique sont disjointes entre les essieux avant et arrière ;

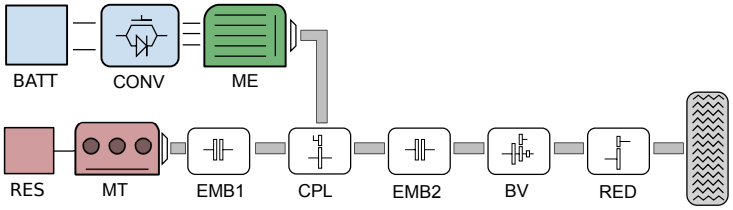


Figure 2.1. Architecture hybride parallèle à deux embrayages.
BATT : batterie, CONV : convertisseur statique AC/DC, ME : machine électrique, RES : réservoir, MT : moteur thermique, EMB : embrayage, CPL : coupleur, BV : boîte de vitesse, RED : réducteur de vitesse.

— les architectures de type hybride série permettent une meilleure utilisation du moteur thermique car celui-ci est découplé des roues. Elles sont proches d'une chaîne tout électrique, à laquelle on aurait ajouté une source thermique en début de chaine de traction, permettant de recharger les batteries (*cf.* figure 2.2). Toutefois, l'ajout d'une machine et d'un convertisseur statique supplémentaires (par rapport à une architecture parallèle) multiplie les conversions d'énergie, ce qui diminue le rendement global de l'architecture. Elle est principalement utilisée dans les transports de plus grande taille comme le bus ;

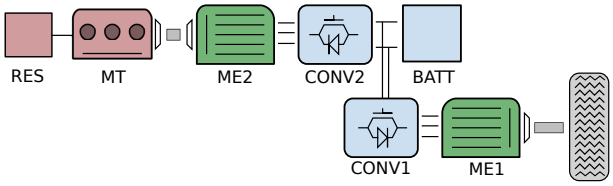


Figure 2.2. Architecture hybride série.

— les architectures purement série/parallèle peuvent fonctionner en mode série ou en mode parallèle (mais pas dans un mode intermédiaire). Un exemple simple est donné par la figure 2.3 ;

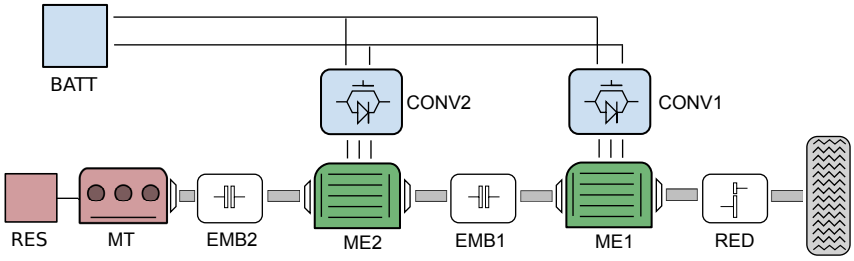
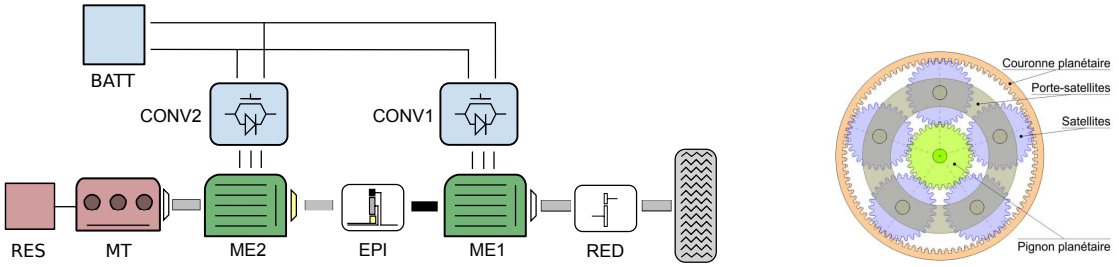


Figure 2.3. Architecture série/parallèle à deux embrayages.

— les architectures à dérivation de puissance (ou *power split*) comme le THS (*Toyota Hybrid System*, *cf.* figure 2.4(a)). Dans ce cas, la présence d'un train épicycloïdal permet un mode de fonctionnement intermédiaire entre les modes série et parallèle, ce qui offre de meilleurs possibilités de fonctionnement pour le moteur [26, 27]. Les agencements peuvent devenir très complexes et les conversions d'énergie sont ici aussi multipliées.



(a) Architecture THS

(b) Train épicycloïdal

Figure 2.4. Exemple d'architecture à dérivation de puissance : le THS (*Toyota Hybrid System*). EPI représente un train épicycloïdal : le moteur est relié au porte satellites, la machine ME2 au pignon planétaire dit "soleil" et la machine ME1 à la couronne planétaire.

Quelle que soit l'architecture choisie, le véhicule électrique hybride se caractérise par des composants clés : le moteur thermique, la batterie et la machine électrique notamment. Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau 2.1 [28].

Tableau 2.1. Caractéristiques des principaux composants pour une application VEH.

	Batterie	Machine électrique	Moteur thermique
rôle	stockage de l'énergie électrique	conversion électromécanique	source principale de motorisation
comportements physiques	électrochimique	électromagnétique ; thermique	thermodynamique ; mécanique
problématique(s) principale(s)	vieillissement	rendement ; puissance volumique	consommation de carburant ; émission de polluants
technologies principales[1]	NiMh ; Li-ion	MSAP ; MAS	moteur à combustion interne (essence ou diesel)
références	[29, 30]	[31, 32]	

1. La technologie NiMh (nickel/hydrure métal) est souvent retenue pour les VEH tandis que le Li-ion (lithium ion) est majoritaire pour les applications VE. Avec de hauts rendement et densité de puissance, les MSAP (machines synchrones à aimants permanents) sont très répandues pour la traction électrique, mais certains constructeurs font toujours appel à la MAS (machine asynchrone).

2.1.2. Description du véhicule de référence

Au cours des chapitres 3 et 4, nous nous intéresserons à une architecture de véhicule en particulier : l'architecture hybride parallèle à deux embrayages, qui est présentée ci-dessus sur la figure 2.1. Ce choix a été fait dans les travaux de V. Reinbold [1], car c'est une architecture relativement simple tout comme sa gestion énergétique. La méthodologie qui sera présentée par la suite est néanmoins parfaitement applicable à d'autres architectures. C'est ce que nous mettrons en œuvre dans le chapitre 5.

Comme cela sera détaillé plus loin, notre travail se focalise sur la conception détaillée de la machine électrique. Nous étudions ici une machine synchrone à aimants permanents enterrés en V. Nous utilisons comme référence l'une des machines utilisées à bord de la Toyota Prius II (THSII), véhicule hybride le plus vendu ces dernières années. Elle a été analysée dans [33 – 36].

Ainsi, le véhicule de référence sur lequel nous basons nos travaux lors des chapitres 3 et 4 a été conçu comme suit :

- le véhicule de base est un véhicule léger, de type thermique conventionnel, et a été étudié sur le banc à rouleau de l'IFSTTAR [37] ;
- il a été virtuellement hybridé par l'ajout d'une chaîne de traction électrique en parallèle, via un coupleur :
  - ➞ le pack de batteries (de type NiMh) est identique à celui de la Toyota Prius II ;
  - ➞ la puissance de la machine électrique est adaptée à celle du pack batteries (29,4 kW) ;
  - ➞ la tension du bus continu est adaptée (via un convertisseur statique DC/DC) ;
  - ➞ le rapport de réduction du coupleur est choisi a priori, connaissant les vitesses de rendement maximum du moteur et de la machine ; la boîte de vitesse et le différentiel sont ceux du véhicule de base.

Notons que le véhicule ainsi constitué, et dont les caractéristiques sont détaillées dans l'annexe B, n'est pas optimisé. Ses composants ont été dimensionnés grâce à la procédure précédente et il nous servira de référence par la suite. La seule hybridation de la chaîne de traction permet en simulation un gain important de consommation (près de 48%) sur un cycle Hyzem urbain [38], que nous présentons dans le paragraphe suivant.

2.1.3. Le triptyque *véhicule - mission - gestion de l'énergie*

Comme son nom l'indique, le véhicule électrique hybride possède plusieurs sources d'énergie. À l'image d'une voiture conventionnelle, il faudra faire le plein de carburant car le moteur à combustion interne reste la motorisation principale. Cependant, une source électrique (des batteries dans notre cas) a été ajoutée en supplément. Il existe différentes associations des deux sources, ou architectures, comme décrit dans la sous-partie 2.1.1. Les batteries pourront être chargées via le moteur thermique ou l'énergie cinétique du véhicule (récupération au freinage). Lorsque l'on aborde le problème de la conception d'un VEH, il devient nécessaire de le considérer en tant que système car [39] :

— premièrement, le véhicule en lui même ne peut pas être considéré uniquement comme un assemblage de composants. On ne peut pas choisir chacun des composants indépendamment des autres, car il existe des couplages. Par exemple, les rapports de réduction vont influencer les vitesses du moteur et de la machine, et donc leur rendement en fonctionnement ;

— deuxièmement, il est primordial de considérer le véhicule dans son environnement : pour quelle utilisation doit-il être conçu ? ;

— enfin, puisqu'il est composé de deux sources distinctes d'énergie (électrique et thermique), il existe plusieurs combinaisons menant à un même fonctionnement du véhicule (vitesse et accélération à la roue). Dès lors, comment répartit-on les flux d'énergie en fonctionnement ? Notamment, quand doit-on charger/décharger la batterie ?

Remarque : Les cycles de fonctionnement du moteur thermique et de la machine électrique sont différents de la mission du véhicule !

Ainsi, le VEH est naturellement régi par un grand nombre d'interactions avec la mission qu'il doit réaliser ainsi qu'avec son système de gestion énergétique, comme résumé sur la figure 2.5.

Les principaux composants et architectures de véhicule ont été présentés dans la sous-partie 2.1.1. Le problème de gestion de l'énergie sera présenté par la suite (*cf.* sous-partie 2.3.3). Pour ce qui est de la mission du véhicule, il faut savoir qu'il existe deux catégories de cycles de mission :

— les cycles normalisés, utilisés (en théorie) pour vérifier que les véhicules commercialisés respectent les normes d'émission de polluants ;

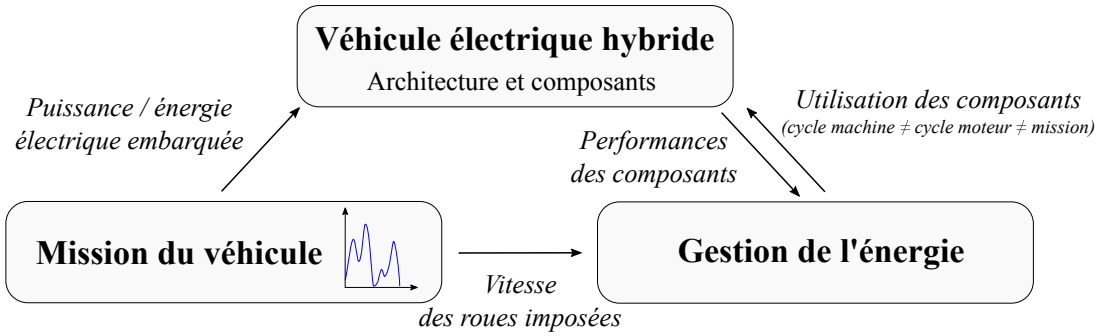


Figure 2.5. Le VEH dans son environnement. Nécessité d'une approche système.

— les cycles issus de mesures, essayant de reproduire au mieux le comportement réel d'un véhicule en usage.

Historiquement, le cycle normalisé européen est le cycle NEDC (New European Driving Cycle). Ce cycle simpliste est devenu aujourd'hui obsolète tant les écarts entre la consommation réelle et celle mesurée sur ce cycle sont grands [40]. Ainsi, il est remplacé depuis 2018 par le cycle WLTC (*Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle*) qui doit permettre d'harmoniser les conditions de test au niveau mondial, et de s'approcher au mieux des conditions réelles de circulation. Des recherches au niveau européen ont été menées dans le but d'établir des cycles plus réalistes. On peut citer notamment les projets Hyzem et Artemis [38, 41], qui, grâce à des études statistiques menées sur les données issus d'usages réels, ont permis d'aboutir à des cycles de référence différenciés selon les usages (urbain, rural et autoroutier). Le cycle Hyzem urbain est présenté sur la figure 2.6.

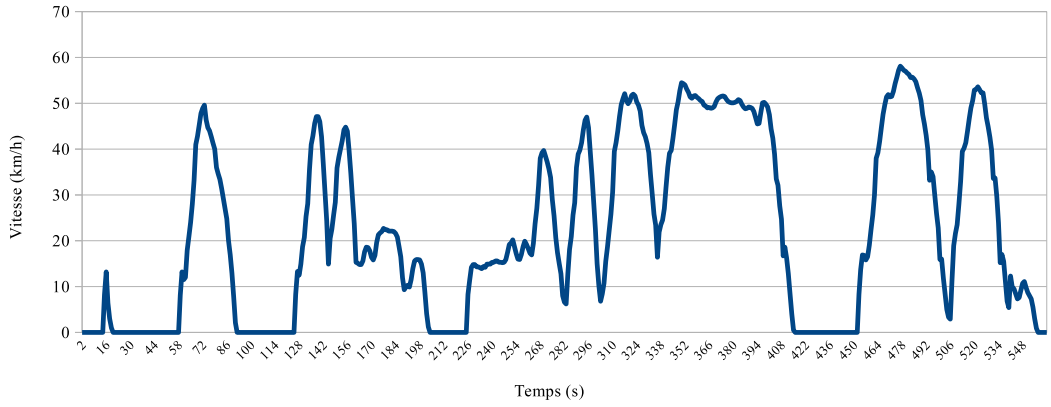


Figure 2.6. Cycle de conduite Hyzem urbain.

Comme décrit dans [1, 39], le choix du cycle d'utilisation du VEH est primordial dans le cadre de sa conception par optimisation. D'une part, le ou les cycles choisis doivent être pertinents quant aux critères et contraintes de conception. D'autre part, l'information contenue dans les cycles doit être compactée au maximum, afin de réduire son traitement lors de l'optimisation (nombre d'itérations, coût de calcul).

La conception d'une chaine de traction d'un véhicule hybride est donc un problème complexe. Cela nécessite la compréhension du comportement de chacun des sous-systèmes et de leurs interactions. Les VEH sont toutefois naturellement plus efficaces que les véhicules conventionnels, particulièrement en utilisation urbaine. Une question vient alors : comment concevoir un véhicule hybride et choisir la source d'énergie adéquate en fonctionnement afin de minimiser sa consommation de carburant lors d'une mission ?

2.2. Optimiser un système énergétique : méthodes et outils

2.2.1. Stratégies de conception des systèmes énergétiques

Avec la montée en puissance des outils de calcul au cours des dernières décennies, il est devenu possible d'étudier et d'optimiser des systèmes complexes possédant une grande quantité de variables. Parmi ceux-ci, on retrouve les systèmes électriques, pour lesquels les problématiques actuelles ne manquent pas : les réseaux électriques (*smart grid*), le bâtiment (intelligent, passif, voire à énergie positive) ainsi que les systèmes de transport (aéronautique, transport en commun, voiture individuelle, etc.) [39].

Concernant les VEH, de nombreux travaux font état des méthodologies existantes pour traiter le problème de l'optimisation simultanée des composants et de la gestion de l'énergie, notamment [42, 43]. Voici quelques définitions, adaptées à notre problématique, qui permettront de comprendre correctement la suite de cette partie :

— *composant* : élément de la chaîne de traction du véhicule hybride ;

— *dimensionnement* : détermination des caractéristiques d'un composant lors de sa conception ; par exemple, nous considérons ici que la puissance est la caractéristique qui permet de dimensionner le moteur thermique ;

— *gestion énergétique* : choix des sources d'énergie et des puissances échangées pour un fonctionnement donné du véhicule, ou une succession de points de fonctionnement (mission) ;

— *optimisation* : comme nous le verrons dans la sous-partie 2.2.2, c'est la résolution d'un problème mathématique, où l'on cherche à minimiser une fonction f par rapport à une ou plusieurs variables et sous un certain nombre de contraintes.

Traditionnellement, on a considéré la conception de manière séquentielle, c'est-à-dire que les phases de dimensionnement et de gestion énergétique se succédaient (*cf.* figure 2.7(a)). Par exemple, la gestion énergétique d'un camion est réalisée sur un dimensionnement fixé

dans [44]. Néanmoins, comme mis en lumière dans la sous-partie 2.1.3, une telle approche ne prend pas en compte les couplages qui existent au sein du système, notamment entre le dimensionnement et la gestion énergétique. Les approches qui coordonnent la résolution des problèmes de dimensionnement et de gestion de énergétique sont donc à privilégier pour s'approcher de l'optimalité du système. Comme présenté sur la figure 2.7, il existe plusieurs approches de ce type :

— une approche alternée est possible [45, 46] (*cf.* figure 2.7(b)). Le dimensionnement et la gestion énergétique sont optimisés de manière distincte et successive dans un processus itératif :

  → à 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 le dimensionnement en se basant sur la gestion énergétique trouvée à l'étape précédente ;

  → une nouvelle itération a lieu jusqu'à convergence du processus.

  Néanmoins, tout comme l'approche séquentielle, cette méthode ne garantit pas l'optimalité du système complet.

— les approches imbriquées sont nettement les plus utilisées dans la littérature [47 – 50] (*cf.* figure 2.7(c)). De telles approches, que l'on peut aussi qualifier de multi-niveau, sont constituées de deux boucles :

  → une boucle externe (ou principale) propose des dimensionnements du système (c'est-à-dire donne des valeurs aux variables de celui-ci) ;

  → pour chacun des dimensionnements, une boucle interne résout le problème de gestion énergétique du véhicule (les dimensionnements sont fixés) ;

  → en fonction des résultats obtenus (consommation de chaque dimensionnement par exemple), de nouveaux dimensionnements sont proposés par la boucle externe.

— enfin, l'approche simultanée met sur le même plan les variables de dimensionnement et de gestion énergétique (*cf.* figure 2.7(d)). Leur optimisation a lieu dans le même temps . 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 [51 – 53].

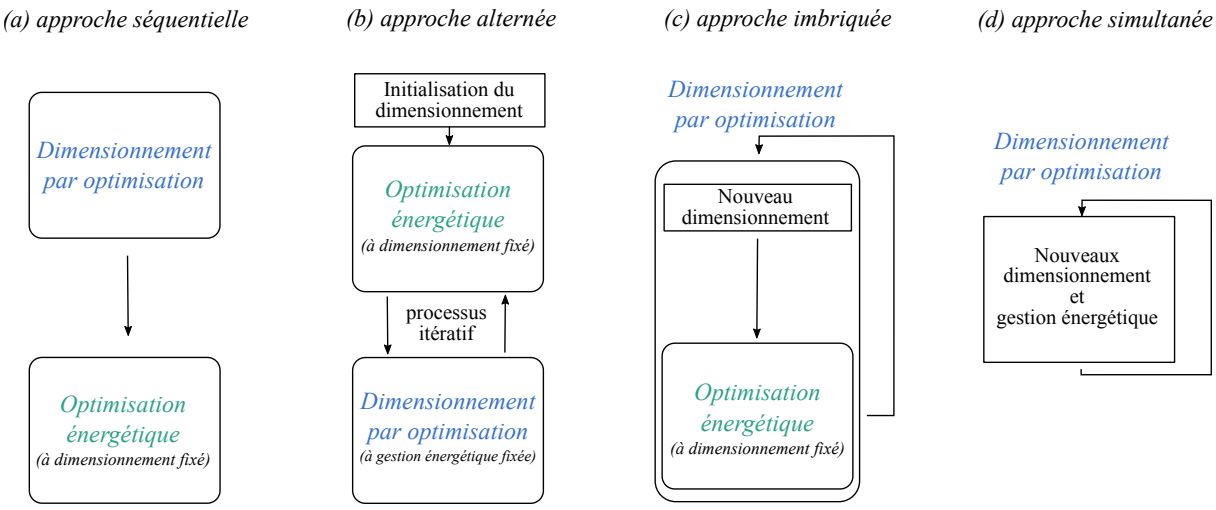


FIGURE 2.7. Description des approches pour l'optimisation d'un système énergétique (composants et gestion énergétique) [42, 43].

Au niveau supérieur, le problème du choix de l'architecture pourra également être traité [26], mais cela sort du cadre de notre travail.

Nous avons introduit dans cette sous-partie le concept d'optimisation, que nous allons appliquer à un système énergétique. Cependant, que se cache t-il concrètement derrière ce terme ?

2.2.2. Problèmes d'optimisation : définition et vocabulaire

L'optimisation est une discipline des mathématiques appliquées dont le but est de résoudre par le calcul des problèmes dont la forme générale est présentée par le système d'équations (2.1), où f est appelée fonction objectif, et g et h sont respectivement les fonctions contraintes d'inégalité et d'égalité.

$$trouver\ \bar{x}\ \in\ X\ tel\ que\ f(\bar{x}) = \begin{cases} min\ f(x) \\ x\ \in\ X \\ g(x) \leq 0 \\ h(x) = 0 \end{cases} \tag{2.1}$$

On dit que l'on cherche à minimiser la fonction f par rapport à la variable x, sous un certain nombre de contraintes.

2.2.2.1. Fonction objectif

La fonction objectif exprime l'objectif fixé par le concepteur. La fonction traduit donc les caractéristiques d'un système en une performance qui peut être économique (ex : son coût), technologique (ex : sa masse), etc. La nature et les propriétés mathématiques de f vont directement influencer la méthode de résolution qui sera choisie. Par exemple, on s'intéressera à la continuité, à la dérivabilité ou encore à la convexité de cette fonction. Les objectifs peuvent être multiples et contradictoires (performance/coût par exemple). On parle alors de problèmes multi-objectifs dont la résolution nécessite des techniques spécifiques. Un front de pareto permet la représentation de l'ensemble des solutions optimales (c'est à dire non dominées, *cf.* annexe A) selon les différents objectifs.

2.2.2.2. Variable

Une variable est une grandeur dont la valeur est provisoirement indéterminée. Il s'agit de trouver la combinaison de valeurs des variables menant à une minimisation de la fonction objectif. Une variable appartient à un ensemble de définition qui peut être fini ou non (par exemple un intervalle). Une variable est définie par sa nature : continue ou discrète. Cela donne lieu à différents types de problèmes : continus (les variables sont continues), combinatoires (les variables sont discrètes) ou mixtes. Ces derniers sont intermédiaires et plus complexes à traiter.

2.2.2.3. Contrainte

Les contraintes du problème sont définies par les fonctions g et h et peuvent être de différentes natures. Les contraintes d'égalité ou d'inégalité s'appliquent directement sur une ou plusieurs variables du système ou bien sur une fonction calculée à partir de celles-ci. Ensuite, elles peuvent dépendre ou non du temps : par exemple on peut avoir affaire à des contraintes de conception atemporelles (ex : masse, encombrement) ou instantanées (ex : couple maximal).

2.2.2.4. Nature du problème d'optimisation

La nature du problème d'optimisation varie notamment en fonction de la linéarité des fonctions f, g et h. On distingue :

— les problèmes linéaires (*Linear Programming*, LP), pour lesquels les fonctions f, g et h sont linéaires ;

— les problèmes quadratiques (*Quadratic Programming*, QP), pour lesquels g et h sont linéaires et f est quadratique convexe ;

— les problèmes non-linéaires (*Non-Linear Programming*, NLP), pour lesquels au moins l'une des fonctions f, g ou h n'est pas linéaire ;

— les problèmes mixtes non-linéaires (*Mixed Integer Non-Linear Programming*, MINLP). De manière générale, il est probable de se trouver par défaut dans cette dernière catégorie où les variables sont continues ou discrètes et au moins une des fonctions f, g ou h n'est pas linéaire. La résolution de tels problèmes nécessite souvent la continuité et la dérivabilité de ces fonctions. [54] passe en revue les méthodes pour résoudre de tels problèmes.

On pourra se référer à [55] qui est une introduction à l'optimisation continue. [56] présente les problèmes d'optimisation convexes en les illustrant par de nombreux exemples. Les problèmes et méthodes classiques de l'optimisation combinatoire sont décrits clairement dans [57]. Enfin, [58] est un site internet qui fait office de guide et permet de comprendre les classes de problèmes et les algorithmes qui y sont adaptés.

Les problèmes dits convexes sont les plus simples à résoudre car la fonction objectif f possède alors un unique extremum, qui est donc un extremum global. Néanmoins, pour des problèmes de grande taille comme le nôtre, on se trouve souvent dans la catégorie non-convexe à cause des variables discrètes et des contraintes. De plus, les problèmes combinatoires sont forcément non-convexes puisque le domaine réalisable est discret. La difficulté avec un problème non-convexe est donc de trouver une solution globale et non pas locale. Certaines méthodes de résolution très performantes pour converger vers un minimum peuvent être piégées par des minima locaux (méthodes de gradients par exemple). Certaines techniques permettent bien souvent de simplifier des problèmes d'optimisation complexes, mixtes et non-convexes. Par exemple, on peut utiliser les méthodes de relaxation. La suppression ou le relâchement de certaines contraintes permet alors d'obtenir un problème plus simple à résoudre.

2.2.3. Résoudre un problème d'optimisation

Comme présenté dans le tableau 2.2, il existe deux grandes classes d'algorithmes de résolution pour les problèmes d'optimisation :

— les algorithmes déterministes, qui, pour un jeu de valeurs initiales donné, mèneront toujours au même résultat. Ces méthodes nécessitent souvent les dérivées premières (matrice jacobienne), voire seconde (matrice hessienne) du problème ;

— les algorithmes méta-heuristiques, généralement basés sur un processus stochastique (aléatoire) itératif. Elles se positionnent donc à l'opposé du déterminisme. Ainsi, deux optimisations successives ne mèneront probablement pas à un même résultat ou amèneront vers l'optimum par des voies différentes. La recherche de l'optimum

global peut se faire pour des problèmes complexes, non-convexes, non-continus, très contraints et surtout non-dérivables ;

— certaines méthodes dites hybrides associent généralement plusieurs algorithmes afin notamment d'en retirer les avantages (recherche globale, rapidité de convergence).

Tableau 2.2. Classification non-exhaustive des algorithmes d'optimisation.

Classe	Sous-classe	Exemples
Déterministe	combinatoire	- programmation dynamique - branch & cut
	continu	- dichotomie (ordre 0) - gradient conjugué (ordre 1) - Newton (ordre 2)
	hybride	
Méta-heuristique	population	- algorithmes génétiques
	parcours	- recherche avec tabous
	direct	- recuit simulé

L'algorithme SQP (*Sequential Quadratic Programming*) est l'un des algorithmes déterministes les plus connus et utilisés. Il est très efficace pour les problèmes continus non-linéaires et contraints (NLP). À partir d'un état initial donné, l'algorithme va construire un modèle quadratique de la fonction objectif et remplacer les contraintes par des approximations linéaires. La résolution de ce sous-problème mène à une solution qui sera utilisée comme initialisation pour l'itération suivante de l'optimisation. L'optimisation est stoppée lorsque les conditions d'arrêt sont atteintes. Toutefois, bien qu'apte à gérer des centaines de contraintes, son principal défaut est de pouvoir rester bloqué dans un minimum local, ce qui est limitant pour la résolution de problèmes non-convexes. On peut cependant relativiser ce défaut, car cela est déjà une performance en soi d'obtenir une solution respectant de très nombreuses contraintes (cahier des charges), notamment dans un contexte industriel.

L'algorithme NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*) [59] est un algorithme génétique multi-objectif basé sur des hypothèses évolutionnistes (gênes, croisement, mutation). Les paramètres d'un tel algorithme sont la taille de la population prise en compte, le nombre de générations à effectuer, et des réglages concernant le processus d'évolution (*cf.* annexe A). Une des limitations d'un tel algorithme est la forte augmentation du temps de résolution pour traiter des problèmes au-delà de quelques dizaines de variables. À partir d'une population initiale (c'est-à-dire d'un ensemble de solutions initiales), obtenue de manière aléatoire, le fonctionnement itératif général est le suivant :

— évaluation et tri des individus selon la fonction objectif ;

— sélection d'individus (tournoi) ;

— évolution des individus sélectionnés (croisement, mutation) ;

— nouvelle population issue des populations initiales et évoluées.

Résoudre un problème d'optimisation c'est donc trouver l'ensemble des valeurs correspondant aux variables du système qui minimise une fonction objectif tout en respectant un certain nombre de contraintes. Selon la nature du problème, certains algorithmes sont à privilégier. Toutefois, afin de traduire un jeu de valeurs en un résultat pour la fonction objectif, il nous reste un élément clé à définir : le modèle du système (et donc de ses composants).

2.2.4. Modèles pour l'optimisation

La modélisation nous permet de représenter le fonctionnement d'un composant ou d'un système. Le modèle peut alors être utilisé pour simuler le comportement d'une telle entité. En phase de conception, il permettra de faire des choix avant une mise en œuvre réelle. Ainsi, le modèle est une boîte de calcul orientée qui fait le lien entre un jeu d'entrées et un certain nombre de sorties correspondantes. Dans le cadre de l'optimisation d'un système, les modèles ont un rôle primordial car ils doivent permettre d'obtenir précisément les sorties en un temps de calcul raisonnable. En effet, lors d'un processus d'optimisation, il pourra être appelé à de très nombreuses reprises (par exemple plusieurs dizaines de milliers de fois avec NSGA-II).

2.2.4.1. Vocabulaire

Les modèles sont tout d'abord définis par une causalité. On parle ici de modèle direct (*cf.* figure 2.8(a)) si les entrées correspondent aux causes et les sorties aux conséquences d'un point de vue physique. Par exemple, on pourrait retrouver en entrée d'un modèle direct de véhicule la puissance fournie par le moteur, et en sortie la vitesse des roues. Dans le cas contraire, on parle de modèle inverse (*cf.* figure 2.8(b)) ou de conception. Par exemple, la vitesse des roues est une entrée et on déduit la puissance que doit alors délivrer le moteur, ce qui est intimement lié à la consommation de carburant.

Lors du calcul des performances du véhicule, on utilisera un modèle direct, tandis que durant le dimensionnement, on fera appel au modèle inverse.

Par ailleurs, tout comportement physique possède sa propre échelle de temps. Par exemple, l'échauffement des composants est un phénomène plutôt lent (de l'ordre de plusieurs secondes voire quelques minutes), tandis que les phénomènes magnétiques dans la machine sont rapides (de l'ordre du millième de seconde). Afin de représenter de telles différences, on distingue deux régimes :



(a) Modèle direct. Les entrées du modèle correspondent aux causes et les sorties aux conséquences.

(b) Modèle inverse. Les entrées du modèle correspondent aux conséquences et les sorties aux causes.

Figure 2.8. Représentation des modèles direct et inverse, comme décrit dans [1].

— le régime transitoire : il apparaît lors d'une évolution dans le système (ex. accélération du véhicule ou ouverture d'un IGBT dans le convertisseur statique). Les variables physiques varient alors temporairement.

— le régime permanent : il est atteint suite au régime transitoire, lorsque le phénomène considéré est stabilisé suite à une évolution dans le système.

Ainsi, à l'échelle de la seconde (c'est-à-dire celle des accélérations du véhicule), les phénomènes magnétiques dans la machine sont stabilisés car ils sont beaucoup plus rapides. Un modèle en régime permanent permettra donc de les représenter (on parle aussi de modèle statique). Au contraire, si l'on souhaite mesurer précisément la température de la batterie à chaque seconde, on devra utiliser un modèle en régime transitoire (ou dynamique) prenant en compte la capacité thermique des matériaux, car le phénomène ne sera pas stabilisé à cette échelle.

En plus de la causalité et de la temporalité d'un modèle, d'autres notions ont leur importance :

— la nature des variables (continue, discrète), qui aura une influence lors de la résolution du problème d'optimisation ;

— la linéarité d'un modèle : la plupart des phénomènes physiques sont non linéaires, mais la linéarisation d'un modèle permet de simplifier les problèmes, et donc de faciliter leur résolution par un algorithme d'optimisation.

2.2.4.2. Les types de modèles utilisés en génie électrique

On fait état dans notre discipline de plusieurs catégories de modèles. Chacune trouve une place lors de la conception d'un système :

— le modèle numérique fin (par exemple, par éléments finis) : il est précis et permet de modéliser des phénomènes très localisés (ex : la saturation magnétique), mais nécessite une résolution lourde via des méthodes numériques. Il sera très adapté à

la validation d'un modèle plus grossier ou pour une analyse fine en vue de faire une modélisation analytique ;

— le modèle analytique : il est basé sur une formulation mathématique issue de la connaissance du phénomène physique représenté ou bien d'une approximation basée sur l'expérience. Il peut être résolu sans méthode numérique, ce qui en fait un outil rapide, mais moins précis ;

— le modèle semi-analytique : il se trouve à mi-chemin entre les modèles analytiques et numériques, ce qui en fait un outil très intéressant pour l'optimisation en terme de compromis entre précision et temps de calcul ;

— la cartographie : c'est une matrice permettant de faire le lien entre les entrées et les sorties du modèle, via une interpolation. C'est un outil très rapide, mais dont la précision dépend fortement de l'échantillonnage des données.

2.3. Positionnement, limites et objectifs de la thèse

Ce travail de thèse prend la suite des travaux de thèse effectués par Vincent Reinbold entre 2011 et 2014 [1]. Ainsi, il a la particularité de s'appuyer sur une solution existante, à approfondir, et non pas de s'écrire à partir d'une page blanche. Cette partie présente le positionnement qui a été choisi lors de ces travaux antérieurs, puis les limites existantes ainsi que les développements que nous envisageons.

2.3.1. Choix d'une approche imbriquée

Lors de ses travaux de thèse, Vincent Reinbold a pu expérimenter une approche imbriquée puis une approche simultanée. Moins mature, l'approche simultanée repose notamment sur des hypothèses fortes quant à la résolution du problème de gestion de l'énergie (variables discrètes non prises en compte). De plus la convergence de cette méthode n'est pas assurée et dépend de l'initialisation des variables, à cause de l'algorithme de résolution choisi (l'algorithme SQP, *cf.* sous-partie 2.2.2). La méthode utilisant une approche imbriquée a, quant à elle, abouti à des résultats plus concluants. Ainsi, nous choisissons de reposer notre travail sur cette dernière approche.

Cette méthode permet de dégager deux problèmes à résoudre : le dimensionnement des composants du véhicule et la gestion de l'énergie sur une mission. Le problème global d'optimisation est résumé sur la figure 2.9. L'approche imbriquée implique que la gestion énergétique sera réalisée sur un dimensionnement fixé à chaque itération. En fonction du

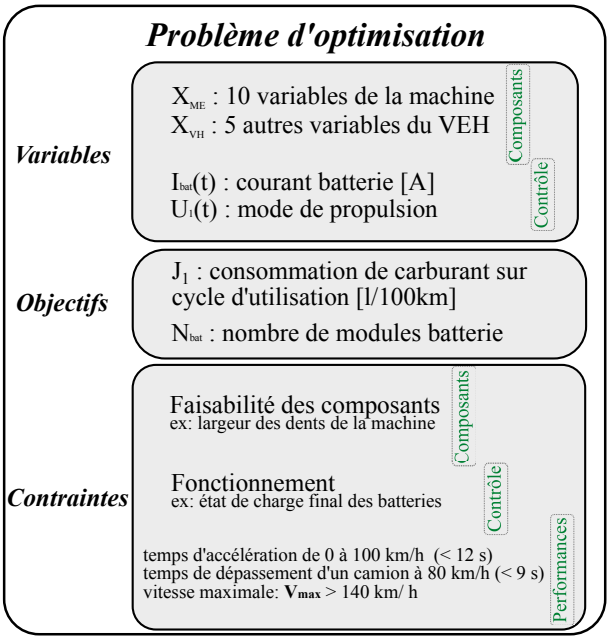


Figure 2.9. Résumé du problème d'optimisation décrit par Vincent Reinbold.

résultat obtenu, un autre dimensionnement sera alors proposé, et ainsi de suite jusqu'à l'atteinte des conditions d'arrêt de l'algorithme.

2.3.2. L'algorithme NSGA-II pour résoudre le problème de dimensionnement

Vincent Reinbold s'est intéressé à la conception du composant machine électrique en tenant compte de ses interactions dans un système de type véhicule hybride. Ainsi, le problème de dimensionnement met en avant un grand nombre de variables associées à la machine. Cela sera détaillé dans la sous-partie 2.3.4.

Notons que son travail s'est focalisé sur un véhicule hybride parallèle à deux embrayages (*cf.* figure 2.1) et que c'est dans ce cadre là que les points suivants sont détaillés. Tel que défini par V. Reinbold, le problème de dimensionnement comporte 15 variables, 15 contraintes et 2 objectifs. Les variables choisies sont 10 variables géométriques de la machine, notées $\mathbb{X}_{me}$, ainsi que 5 grandeurs clés du VEH, que l'on notera par la suite $\mathbb{X}_{vh}$:

— $\mathbb{X}_{vh}$, les variables dimensionnantes retenues pour le VEH (hors machine) :

→ N_{bat}, le nombre de modules dans la batterie ;

→ U_{bus}, la tension continue du convertisseur statique (V) ;

→ P_{mt}, la puissance du moteur thermique (W) ;

→ k_{cpl}, le rapport de réduction de couplage entre la machine électrique et la chaine conventionnelle (moteur thermique) ;

  - → k_{red}, le rapport de réduction du réducteur de vitesse, c'est-à-dire le dernier étage de réduction (réducteur final et différentiel) ;
- — $\mathbb{X}_{me}$, les variables géométriques de la machine électrique. Elles seront décrites plus précisément dans la sous-partie 2.3.4.

Les contraintes de dimensionnement du problème sont résumées ci-dessous. Le détail est présenté en page 108 de [1]. Elles peuvent être scindées en deux groupes :

- — la faisabilité des composants, tel que l'épaisseur minimale des dents au stator de la machine ;
- — les performances du véhicule, comme la vitesse maximale qu'il doit pouvoir atteindre.

Les deux objectifs choisis sont antagonistes : minimiser la consommation de carburant du véhicule sur cycle d'utilisation et minimiser le nombre de modules de la batterie. En effet, en augmentant le taux d'hybridation du véhicule (c'est-à-dire la part de la puissance électrique embarquée), la consommation sera réduite. Ce double objectif permet donc de visualiser la gain de consommation théoriquement obtenu lorsque l'on augmente la part de l'énergie électrique dans le VEH. Notons que d'autres objectifs auraient pu être choisis comme l'encombrement des composants, le coût du système, etc.

C'est l'algorithme NSGA-II qui a été choisi pour résoudre le problème de dimensionnement. Cela est cohérent au vu de sa nature (non-convexe, multi-objectif, peu de contraintes).

2.3.3. La programmation dynamique pour résoudre le problème de gestion énergétique

Le second problème d'optimisation, imbriqué dans le premier, est celui de la gestion énergétique du véhicule. Cette problématique est intrinsèque aux systèmes possédant plusieurs sources d'énergie. En effet, à chaque instant de la mission du véhicule, il faut (dans le cas d'une architecture hybride parallèle) répartir la puissance demandée entre le moteur thermique et la machine électrique, c'est-à-dire construire leurs propres cycles de fonctionnement. Cela doit être fait compte tenu de :

- — la demande de puissance imposée à tout instant par la mission du véhicule ;
- — la performance des composants du système ;
- — l'état, à tout instant, des composants (ex : état de charge de la batterie) et des contraintes qui leur sont imposées (ex : état de charge final) ;

— les objectifs d'optimisation (ex : consommation de carburant minimale).

Nous souhaitons comparer différents dimensionnements de VEH vis-à-vis de leur consommation de carburant. Ainsi, la gestion énergétique à bord du véhicule doit être optimale afin que la comparaison soit objective, c'est-à-dire faite sur le meilleur fonctionnement possible pour chacun des dimensionnements. De plus, nous devons nous assurer de la neutralité des effets de la batterie sur la consommation, pour ne pas fausser la valeur obtenue. Cela se traduit par une contrainte d'égalité sur l'état de charge de celle-ci entre le début et la fin de la mission. Cette contrainte dite de "*charge sustaining*" est de toute façon nécessaire dans le cadre d'une application VEH afin de pouvoir enchainer les missions. À l'inverse, on parlera de "*charge depleting*" lorsque l'on autorise la batterie à être déchargée au cours du cycle. C'est le cas pour les applications VHR.

Si l'on considère une architecture hybride parallèle à deux embrayages, on s'aperçoit que le fonctionnement du véhicule est fixé par la connaissance de deux variables :

— l'état (ouvert/fermé) de l'embrayage adossé au moteur (EMB1, *cf.* figure 2.1) détermine le choix entre une utilisation électrique ou hybride ;

— le courant fourni par la batterie définit la part de puissance délivrée par chacune des sources.

Remarques : Le second embrayage (EMB2 sur la figure 2.1) a pour rôle de permettre le passage des différents rapports de la boite de vitesses (le point de patinage est considéré). Dans notre cas, le choix du rapport de boite ne sera pas optimisé, mais fixé préalablement selon la mission du véhicule.

Les différents modes de fonctionnement pour cette architecture sont présentés dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3. Modes de fonctionnement de l'architecture hybride parallèle à deux embrayages [1]. La puissance demandée à la roue (P_r) provient de la puissance fournie par la machine électrique (P_{me}) et/ou de celle fournie par le moteur thermique (P_{mt}).

Modes de fonctionnement	P_{me}	P_{mt}	P_r
hybride "boost"	>0	>0	>0
hybride "flux série"	<0	>0	>0
électrique traction	>0	$=0$	>0
électrique récupération	<0	$=0$	<0
chargement des batteries à l'arrêt	<0	>0	$=0$
thermique	$=0$	>0	>0

Les stratégies de contrôle peuvent être classées selon leur nature [23, 60]. On distingue d'un côté les méthodes basées sur des règles empiriques issues de l'expérience ou

de l'intuition. Un exemple est donné dans [61]. A contrario, il existe les méthodes basées sur l'optimisation auxquelles nous nous intéresserons plus particulièrement ici. Dans cette catégorie, on trouve d'un côté les méthodes optimales, et d'un autre côté les méthodes temps réel [62, 63]. Ces dernières sont sous-optimales, même si leurs performances s'en rapprochent [64]. Contrairement aux méthodes optimales, elles sont adaptées à une utilisation en ligne, c'est-à-dire sans connaissance préalable de la mission, et donc à une mise en œuvre sur un procédé réel.

Nous présentons à présent deux méthodes optimales classiquement utilisées pour ce type de problème :

— l'algorithme de programmation dynamique ;

— le principe du minimum de Pontryagin.

Leurs performances sont très semblables, comme décrit dans [65].

2.3.3.1. Programmation dynamique

Considérons un espace discrétisé où l'on peut représenter l'état de charge de la batterie ("*state of charge*", SoC) en fonction du temps. Il s'agit alors de définir la trajectoire du SoC tout au long de la mission afin de minimiser notre objectif (ici la consommation) tout en respectant les contraintes du système (bilan charge/décharge de la batterie nul, limite de charge et décharge).

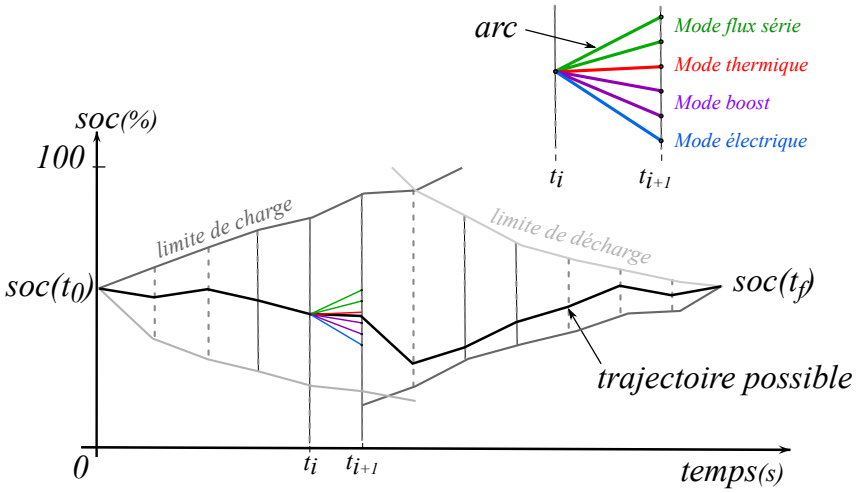


Figure 2.10. Représentation du problème de gestion de l'énergie, tel qu'il est abordé via un algorithme de programmation dynamique. Notons l'égalité entre l'état de charge initial ($\mathrm{soc}(t_o)$) et final ($\mathrm{soc}(t_f)$).

L'algorithme de programmation dynamique repose sur le principe d'optimalité de Bellman [66], que l'on peut résumer par : *"toute portion de la trajectoire optimale est elle-même optimale"*. Ainsi, en calculant la consommation de chaque arc, il est possible par construction de déterminer la trajectoire optimale (*cf.* figure 2.10). Cette approche

est très robuste et toujours optimale, en regard de la discrétisation choisie. Néanmoins, les ressources processeur et mémoire (RAM) demandées sont importantes, et augmentent avec la précision (c'est-à-dire une discrétisation élevée du temps et du SoC).

2.3.3.2. Principe du minimum de Pontryagin

L'utilisation du principe du minimum de Pontryagin est une méthode optimale de type variationnelle. Concrètement, il s'agit de minimiser à chaque instant de la mission, une fonction H appelée hamiltonien du système. H dépend du temps t, de la variable d'état $x(t)$, de la commande $u(t)$ ainsi que du multiplicateur de Lagrange $\lambda(t)$ qui est déterminé par les contraintes du système. Il prend la forme :

$$H(x(t), u(t), t, \lambda(t)) = \lambda^T(t) \cdot e(x(t), u(t)) + L(x(t), u(t), t) \tag{2.2}$$

où e est la fonction d'état du système (dans notre cas, liant l'énergie disponible dans la batterie à la puissance qu'elle délivre) et L le coût instantané (dans notre cas la consommation de carburant). Si H est convexe, alors il existe une commande unique qui le minimise à chaque instant, et qui minimise la consommation de carburant globalement. Un exemple est donné dans [67]. Cette méthode s'avère relativement rapide lorsque l'on a connaissance de λ, et peut être transposée en ligne, c'est-à-dire sur un procédé réel. Néanmoins, les conditions données par le principe de Pontryagin sont nécessaires mais non suffisantes à l'obtention de la commande optimale [68].

Notons que ces deux méthodes optimales nécessitent la connaissance complète du cycle de fonctionnement du véhicule, et sont coûteuses en ressources processeurs. Certains prennent le parti de travailler sur des points de fonctionnement spécifiques du cycle de mission afin de simplifier le problème, comme dans [69, 70].

Dans notre cas, c'est l'algorithme de programmation dynamique qui a été choisi pour résoudre le problème de gestion d'énergie sur cycle. Nous obtiendrons ainsi la consommation optimale pour un dimensionnement donné. Cela est justifié par le besoin d'une commande optimale qui permet de comparer les dimensionnements de manière objective. En effet, la commande optimale aboutit à la consommation théorique minimale que l'on peut espérer atteindre avec un dimensionnement donné.

2.3.4. Modélisation : focus sur la machine électrique

Lors de ses travaux de thèse, Vincent Reinbold s'est intéressé à la conception précise d'une machine électrique dans le cadre de l'optimisation systémique d'un véhicule hybride. La machine est en effet un composant clé du VEH car elle permet la conversion d'énergie

électromécanique de manière réversible. Cela donne tout leur intérêt à ces véhicules qui peuvent récupérer l'énergie au freinage et la réutiliser ensuite. Ainsi, tout un travail de modélisation électromagnétique de la machine a été réalisé en vue d'une utilisation en optimisation. Les modèles utilisés par V. Reinbold sont schématisés sur la figure 2.11. Le modèle complet du véhicule inclut également les modèles des autres composants de celui-ci. Ils ont été développés au Laboratoire Transports et Environnement (LTE).

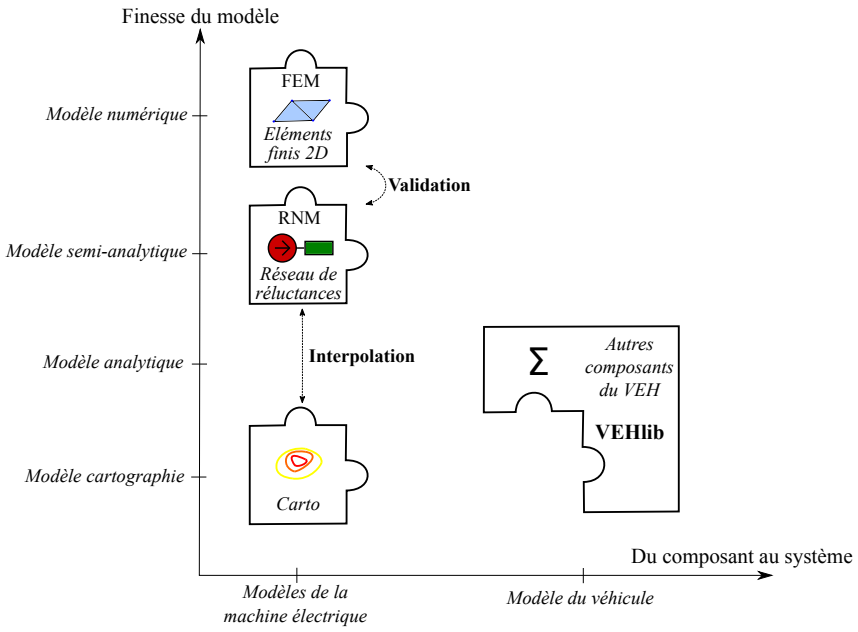


Figure 2.11. Classification des modèles utilisés par Vincent Reinbold.

Sur cette figure, on observe les différents niveaux de modélisation de la machine électrique. Le modèle clé du travail de V. Reinbold est le modèle électromagnétique semi-analytique par réseau de réluctances de la machine électrique. Ces réseaux reposent sur une analogie entre phénomènes magnétiques et électriques [71]. Par exemple, le flux magnétique y est équivalent à l'intensité du courant électrique, et les réluctances (c'est-à-dire la résistance d'un matériau à laisser s'établir un champ magnétique) sont représentées par des résistances. Cette analogie est dite d'Hopkinson.

Ce modèle semi-analytique permet d'obtenir le couple de la machine en fonctionnement à partir de la commande (courant, angle d'autopilotage) et de la géométrie. En effet, comme présenté sur la figure 2.12, la géométrie est paramétrée par 10 variables. La particularité de ce modèle est de pouvoir représenter différentes positions mécaniques du rotor (chaque pas dentaire pour être exact) via un unique schéma réluctant [1].

Un modèle en deux dimensions par éléments finis a également été utilisé afin de valider le réseau de réluctances. Cette étape, très importante, a permis de comprendre les trajets du flux magnétique dans la machine lors de son fonctionnement. En effet, le modèle

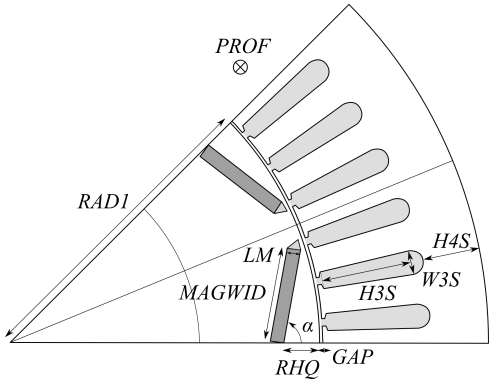


Figure 2.12. Description des variables géométriques associées à la machine électrique ($\mathbb{X}_{me}$). Elles sont au nombre de 10 : RAD1 : le rayon du rotor, RHQ : la distance entre le "pied" de l'aimant et l'entrefer, LM : la longueur des aimants, MAGWID : l'épaisseur des aimants, GAP : l'épaisseur de l'entrefer, H3S : la longueur des encoches, H4S : l'épaisseur de la culasse, W3S : la largeur des encoches, PROF : la profondeur de la machine et α : l'inclinaison des aimants. Toutes ces variables sont continues.

réluctant doit être construit à partir de cette information afin de représenter effectivement le comportement de la machine malgré une précision moindre.

Néanmoins, l'optimisation énergétique du véhicule nécessite un grand nombre d'appels aux modèles du système, et donc à celui de la machine. Or, l'appel au modèle réluctant reste trop coûteux, comme nous le verrons au chapitre suivant. Ainsi, un modèle de cartographie est utilisé. Il permet de représenter le rendement de la machine en fonction de son couple et de sa vitesse. Un exemple est donné sur la figure 2.13.

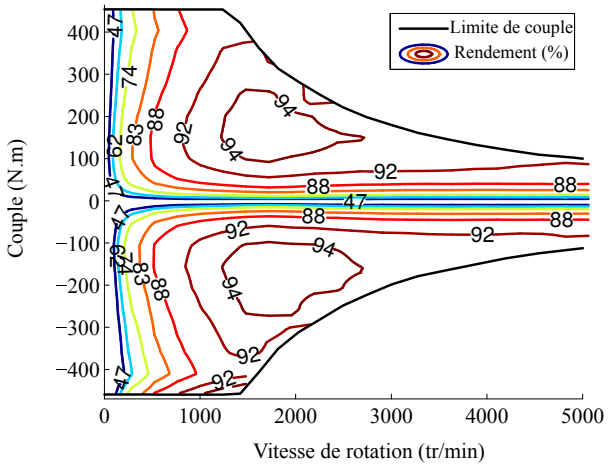


Figure 2.13. Exemple de cartographie de rendement de la machine électrique.

L'ensemble de ces modèles est finalement utilisé dans le processus imbriqué d'optimisation, illustré sur la figure 2.14. Cette approche propose une boucle d'optimisation principale qui réalise le dimensionnement du véhicule. En interne de cette boucle, et pour chacun des dimensionnements qu'elle fixe, l'optimisation énergétique du véhicule est réalisée. Le fonctionnement optimal sur cycle est calculé à partir de la cartographie de la machine électrique ainsi que des modèles des autres composants du véhicule (modèles

analytiques et cartographie). À la fin du processus itératif, un ensemble de solutions optimales est obtenu pour les deux objectifs considérés.

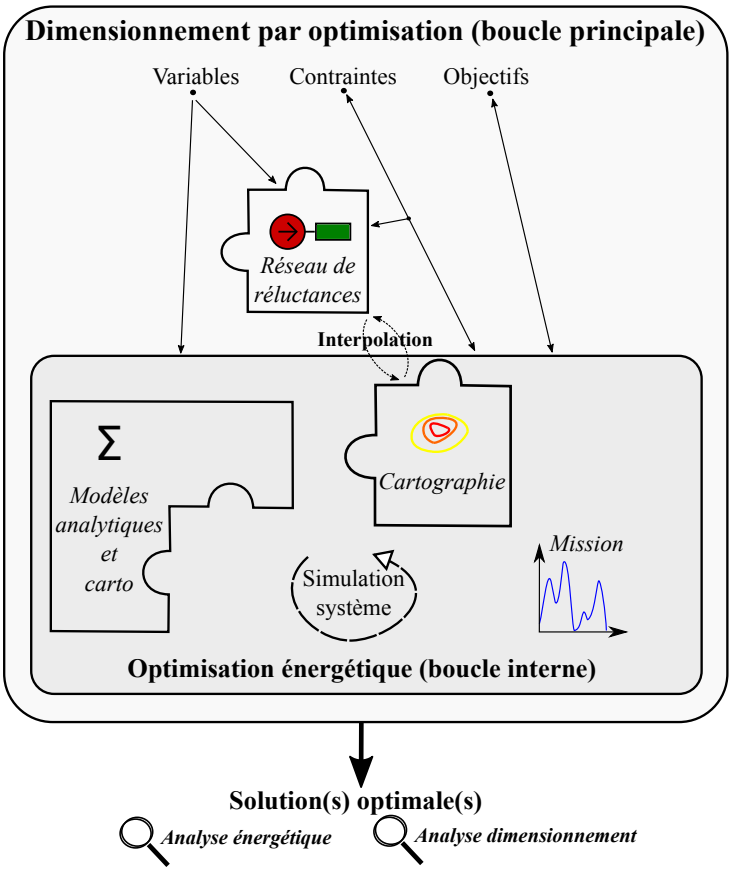


Figure 2.14. Positionnement des modèles dans l'approche imbriquée développée et utilisée par Vincent Reinbold dans [1].

2.3.5. Limites initiales et approfondissements envisagés

Le travail réalisé par Vincent Reinbold a permis de mettre en place une méthodologie cohérente de dimensionnement d'un véhicule hybride. La machine électrique est conçue avec précision et en tenant compte de ses interactions avec le système. Cela ouvre de nombreuses perspectives quant à l'approfondissement de la méthode ainsi que des modèles.

Suite aux travaux de V. Reinbold, il existe un modèle électromagnétique de la machine électrique. Ce modèle semi-analytique permet de calculer le couple de la machine, notamment à partir de 10 variables géométriques continues ($\mathbb{X}_{me}$), ainsi que de la commande qui lui est appliquée (courant et angle). Dans la continuité de ces travaux, nous nous intéresserons dans le chapitre 3 à l'intégration d'une nouvelle variable d'entrée : le nombre de pôles de la machine. Ce travail présente de multiples intérêts :

— le nombre de pôles est une variable clé : comme nous le verrons, elle a une influence directe sur la géométrie et le fonctionnement de la machine. Son impact sur un dimensionnement complet est donc attendu et sera présenté ;

— c'est une variable discrète : or, jusqu'à présent, toutes les variables du problème de dimensionnement étaient continues. Intégrer une telle variable présente donc un intérêt méthodologique. Une approche simple est mise en place, et d'autres pistes sont explorées ;

— chronologiquement, ce premier travail nous a permis de prendre en main le problème et les outils développés jusqu'ici.

Les échauffements dans les machines électriques sont parmi les principaux facteurs de dysfonctionnement voire de dégradation de celles-ci. C'est de plus un phénomène fortement dimensionnant dans une application avec des contraintes de compacité. En complément de la modélisation électromagnétique de la machine, il est judicieux de s'intéresser à la modélisation thermique de celle-ci. Comme il en est fait état dans la littérature, c'est une problématique actuelle importante. Jusqu'ici, V. Reinbold n'utilisait pas de modèle thermique de la machine, mais appliquait simplement une contrainte sur la densité de courant pouvant circuler dans les enroulements. Notre principal apport dans ce cadre là est la prise en compte des échanges autour des têtes de bobines (modélisation 3D), ce qui nous a permis de concevoir un modèle thermique cohérent pour l'optimisation. Ce travail sera présenté dans la première partie du chapitre 4.

Nous avons également expérimenté l'utilisation d'une étude de sensibilité dans ce processus de dimensionnement. Ce type de travail doit permettre de mettre en avant les paramètres clés de nos modèles. Nous avons appliqué une méthode de ce type lors du développement du modèle thermique. De nombreux paramètres thermiques sont effectivement incertains notamment vis-à-vis des procédés de fabrication de la machine ou parce qu'il sont difficilement quantifiables. La seconde partie du chapitre 4 présente la mise en place de l'étude de sensibilité et les résultats qui en découlent. Finalement, le modèle thermique sera intégré au processus de dimensionnement et son impact sera analysé.

Enfin, et cela a été pris en compte tout au long de notre travail, nous avons cherché à réduire les temps de calcul. En effet, dans le cadre d'une démarche d'optimisation, et notamment pour une approche utilisant un algorithme génétique, ce point se révèle important. Il permet de fiabiliser les résultats en reproduisant un plus grand nombre de fois le processus d'optimisation. De plus, cela ouvre la perspective de l'étude d'architectures plus complexes, c'est-à-dire comptant un plus grand nombre de variables. C'est ce qui sera développé dans le chapitre 5. L'accélération du processus d'optimisation (d'un fac-

teur 3 environ) au cours de notre travail, a notamment découlé de la prise en compte des évolutions logicielles récentes. Cela a en grande partie été réalisé lors du stage de Côme Dumont dont nous avons assuré l'encadrement.

En résumé, nous considérons dans notre travail :

- l'étude de la conception fine d'une machine électrique intégrée à une chaîne de traction pour un véhicule électrique hybride ;
- une approche système intégrant l'environnement de la machine : le véhicule, la mission de celui-ci et la gestion énergétique ;
- une gestion énergétique optimale et un bilan batterie nul sur la mission du VEH afin de garantir une comparaison équitable des dimensionnements ;
- un processus d'optimisation de type imbriqué, constitué d'une boucle principale consacrée au dimensionnement par optimisation, et d'une boucle interne réalisant l'optimisation énergétique des véhicules.

CHAPITRE 3

Influence du nombre de pôles de la machine électrique

Contenu

3.1. Modélisation électromagnétique de la machine 56
3.1.1 Description et fonctionnement des machines synchrones 56
3.1.2 Notion de paire de pôles 59
3.1.3 Présentation du modèle par réseau de réluctances 60
3.1.4 Validation par un modèle éléments finis 62
3.2. Modélisation du système 65
3.2.1 Construction d'une cartographie de rendement 65
3.2.2 Modélisation du véhicule 67
3.3. Optimisation sur cycle de fonctionnement et analyse 69
3.3.1 Optimisation d'une variable discrète par NSGA-II 69
3.3.2 Bilan quant au temps de calcul 72
3.3.3 Impact sur le dimensionnement et le fonctionnement global du véhicule 72
3.3.4 Impact sur l'encombrement de la machine 76
3.4. Conclusion 78

Ce chapitre est une mise en application de la méthodologie décrite précédemment. Nous proposons d'intégrer le nombre de pôles de la machine électrique comme nouvelle variable de dimensionnement de celle-ci, et donc du véhicule. Dans une première partie, nous verrons que ce paramètre est important et qu'il va influencer par nature la géométrie et le fonctionnement de la machine. Ce sera l'occasion de décrire plus en détail le modèle électromagnétique de la machine. Ensuite, nous présenterons les outils et méthodes qui nous permettent à ce jour d'intégrer le modèle de la machine au processus de dimensionnement. L'intégration de la nouvelle variable discrète sera discutée. Enfin, dans une dernière partie, nous analyserons les résultats obtenus pour le système (dimensionnement global et fonctionnement) et plus particulièrement pour la machine (encombrement).

3.1. Modélisation électromagnétique de la machine

3.1.1. Description et fonctionnement des machines synchrones

Les machines électriques synchrones sont des systèmes réversibles de conversion électromécanique de l'énergie. Ainsi, alimentées par un courant électrique, elles fournissent une puissance mécanique (fonctionnement en moteur). À l'inverse, elles peuvent fournir une puissance électrique à partir d'une sollicitation mécanique (fonctionnement en alternateur). C'est le cas notamment des génératrices électriques de forte puissance utilisées dans les centrales hydroélectriques.

Elles sont caractérisées par des puissances massiques et des rendements élevés, ce qui les indique tout particulièrement pour l'application au véhicule hybride [31]. En effet, nous rappelons que l'intérêt de ce type de véhicules réside en leur capacité à récupérer de l'énergie au freinage (recharge de la batterie) pour pouvoir la restituer en traction afin d'obtenir des gains sur la consommation de carburant.

Nous nous intéressons ici à la modélisation d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) (*cf.* figure 3.1). Elle se compose d'un stator fixe (externe) à l'intérieur duquel se trouve un rotor qui peut tourner selon un axe de rotation. Le fonctionnement d'une telle machine repose sur les lois de l'électromagnétisme. Un champ électromagnétique tournant est créé au stator grâce à un système électrique triphasé commandé par un convertisseur AC/DC. Au rotor, les aimants créent un champ constant. L'interaction entre ces deux champs est à l'origine du mouvement du rotor. La machine est dite synchrone car en régime permanent, la vitesse du rotor est proportionnelle à la pulsation électrique

des courants au stator (*cf.* équation 3.2). Les champs du stator et du rotor sont toutefois en déphasage angulaire à cause du couple appliqué sur l'arbre. Les repères et notation utiles à la compréhension du fonctionnement de la machine sont présentés sur la figure 3.2.

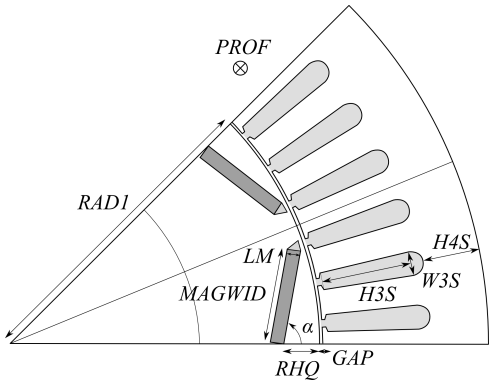


Figure 3.1. Schéma d'une machine synchrone à aimants permanents ($1/8^{ème}$ de la machine).

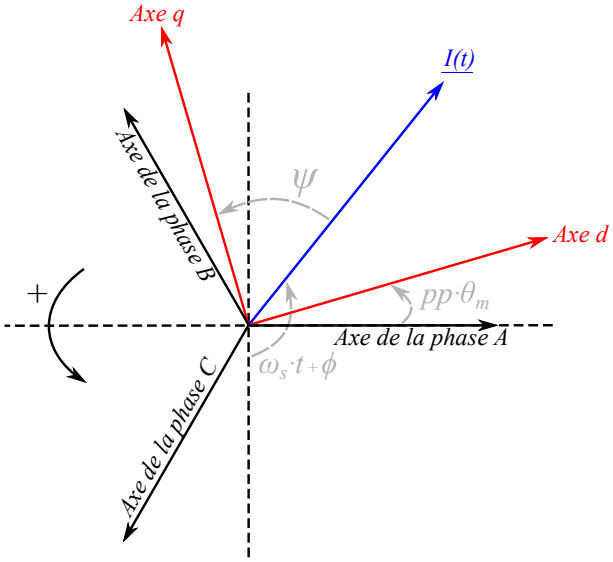


Figure 3.2. Notations et repères pour le fonctionnement de la machine. L'angle mécanique est noté θ_m, le nombre de paires de pôles pp, la pulsation électrique ω_s, le temps t. ϕ est la phase du courant de la phase A pour t=0. L'angle de commande ψ permet le contrôle entre le stator et le rotor. Dans ce cas précis, le champ magnétique $\underline{\text{I(t)}}$ est en avance sur l'axe d ($\psi \in [-\pi/2,\ \pi/2]$) si l'on considère une rotation dans le sens positif. C'est donc un fonctionnement moteur. Les notations sont celles utilisées dans [1].

Les axes d (direct) et q (transverse) représentent la position mécanique du rotor. L'axe direct est défini comme étant l'axe du flux magnétique des aimants. Au stator, on trouve un système de courants triphasés alternatifs, supposé équilibré direct. Il est représenté par les phases A, B et C. Le champ magnétique résultant se trouve dans l'axe bleu, noté $\underline{\text{I(t)}}$, de la figure 3.2. L'angle mécanique θ_m est nul lorsque la phase A et l'axe d sont en phase.

Dans notre cas, la commande de la machine est effectuée via un convertisseur de puissance à fréquence variable du côté électrique de la machine. Le couple est commandé par l'angle ψ (déphasage entre les champs) et l'intensité des courants circulant au stator.

Si l'on considère une machine à pôles lisses, l'expression du couple électromagnétique au premier harmonique est en effet de la forme [72, 73] :

$$C_{em} = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot pp \cdot \Phi_d \cdot I_{ME} \cdot \sin(\psi + \pi/2) \tag{3.1}$$

où Φ_d est le flux magnétique généré par les aimants (flux inducteur) vu par une phase, I_{ME} la valeur efficace du courant au stator et pp représente le nombre de paires de pôles de la machine (*cf.* sous-partie 3.1.2). Dans ce cas, le couple évolue de manière sinusoïdale avec l'angle de commande et atteint sa valeur maximale lorsque les flux inducteur (rotor) et d'induit (stator) sont en quadrature ($\psi = 0$) et que le courant est maximal.

Pour une machine à pôles saillants, le couple est issu de la superposition de trois composantes :

— le couple synchrone dû à l'interaction entre les champs, comme pour la machine à pôles lisses, et qui s'exprime en $\sin(\psi + \pi/2)$;

— le couple réluctant dû à la saillance du rotor, s'exprime en $\sin(2 \cdot \psi + \pi/2)$. Sa période est moitié moins grande que celle du couple synchrone ;

— le couple de détente dû à la saillance du stator (encoches). Il est à l'origine d'une ondulation de couple que l'on peut chercher à minimiser car cela cause du bruit et des vibrations. Sa période est fonction du nombre d'encoches dans la machine.

La machine que nous étudions possède une saillance inversée de par la disposition en V de ses aimants. Cela permet notamment une concentration du flux dans l'entrefer, ce qui augmente les performances de la machine [72, 74]. Le contrôle de la vitesse de la machine est réalisé via la fréquence f du premier harmonique des courants délivrés par le convertisseur statique alimentant le stator. La vitesse de rotation Ω_{ME} de la machine et la pulsation ω_s des courants statoriques sont liés par la relation 3.2 en régime permanent. Ainsi, on peut dire que le nombre de paires de pôles joue le rôle de rapport de réduction électromécanique.

$$pp \cdot \Omega_{ME} = \omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f \tag{3.2}$$

Néanmoins, comme cela est illustré sur la figure 3.3, cette plage de fonctionnement reste limitée par des contraintes d'ordre thermique à faible vitesse (ce qui limite le courant d'alimentation) et de puissance maximale au delà de la vitesse de base (car la tension de l'alimentation est limitée).

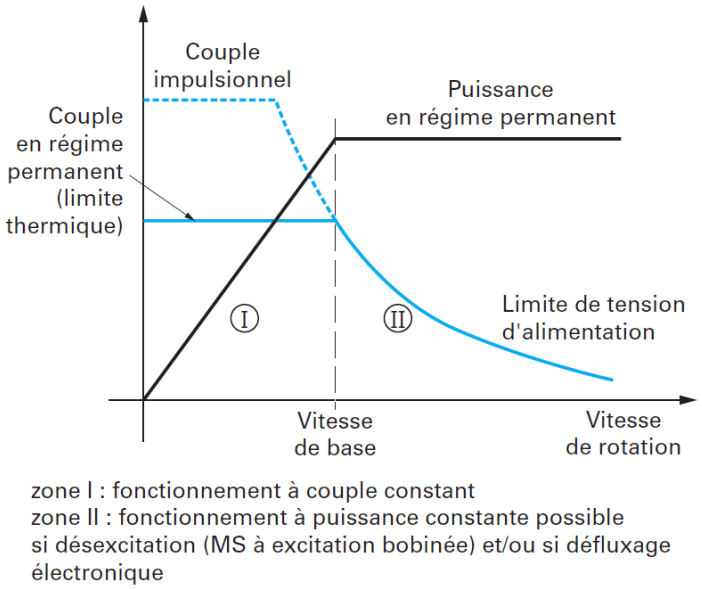


Figure 3.3. Caractéristique couple-vitesse type d'une machine synchrone autopilotée [72].

3.1.2. Notion de paire de pôles

Comme nous avons pu le voir dans la sous-partie précédente, le nombre de paires de pôles influence les performances de la machine. Notamment, le rendement maximal de celle-ci est atteint pour des couples et des vitesses bien différentes selon la valeur de p. Nous présentons ici plus en détail ce paramètre.

Au rotor d'une machine électrique, l'aimantation est alternée. Dans notre cas, le pôle nord des aimants est successivement orienté vers le centre de la machine, puis vers l'extérieur (stator). L'association d'un pôle nord avec le pôle sud qui lui est voisin est appelé paire de pôles.

Tout au long de cette étude, nous choisissons d'étudier des machines avec deux encoches par pôles et par phase, ce qui est la valeur de la machine de référence (*cf.* sous-partie 2.1.2). Ainsi, le nombre d'encoches au stator augmente proportionnellement au nombre de pôles du rotor.

D'après [75], on peut dégager trois types de machines électriques :

— les machines à grand nombre de pôles et à fort couple massique. Elles sont donc relativement lentes d'après l'équation 3.2, pour une fréquence d'alimentation donnée ;

— les machines à faible nombre de pôles (donc rapides) et à forte puissance massique ;

— les machines plus classiques tournant relativement vite pour avoir une puissance massique satisfaisante.

On s'aperçoit encore une fois ici que le nombre de pôles et les performances (couple, vitesse) sont liés. De plus, la problématique de la compacité apparait. Dans [75], les auteurs constatent notamment que, si l'on contraint leur diamètre externe, l'optimisation

de machines à faible nombre de pôles mène à des structures allongées. Au contraire, lorsque le nombre de pôles augmente, les machines ont tendance à être aplaties avec un stator de faible épaisseur.

Les auteurs de [76] indiquent que dans le cadre d'une application où la compacité est un critère de première importance, plusieurs leviers sont à considérer, par exemple la vitesse de la machine et les niveaux d'induction dans celle-ci. En effet, le couple développé par la machine étant proportionnel au volume de son rotor [77], il faut augmenter la vitesse de base de la machine pour obtenir une puissance élevée à encombrement donné. Une diminution du nombre de pôles de la machine permet une telle augmentation de la vitesse de base. Certaines limites sont néanmoins à prendre en compte à haute vitesse, comme les contraintes mécaniques, les pertes fer et le bruit.

Le couple développé par la machine est également dépendant de l'induction dans l'entrefer de celle-ci. Il est à noter qu'en augmentant le nombre de pôles, le flux produit par chacun d'entre eux diminue. Ainsi, à induction maximale donnée, l'épaisseur de la culasse pourra être réduite [75].

Lorsque l'on considère la conception de la machine seule, le choix du nombre de pôles est donc a priori une affaire de compromis entre les performances de la machine et son encombrement. Rappelons que la machine de référence est composée de 8 pôles, soit 4 paires de pôles et de 48 encoches.

3.1.3. Présentation du modèle par réseau de réluctances

Comme nous l'avons introduit au chapitre précédent, le modèle de la machine électrique qui a été développé dans [1] est semi-analytique et quasi-statique. Il est constitué d'un réseau de réluctances, approche basée sur l'équivalence entre les phénomènes magnétiques et électriques. En effet, le chemin du flux magnétique dans la machine peut être représenté par un circuit électrique équivalent. La résolution de celui-ci sera effectuée via des méthodes numériques détaillées plus loin (*cf.* sous-partie 3.2.1). Une étude préalable via une modélisation par éléments finis a permis de déterminer les phénomènes en jeu dans la machine (fuites, saturation, etc.) afin de calibrer au mieux le réseau réluctant.

La principale difficulté ici est la modélisation de l'entrefer. En effet, l'appel du modèle pour différentes valeurs de l'angle d'autopilotage (ψ) impose théoriquement un grand nombre de réluctances d'entrefer pour modéliser les différentes positions du rotor. Ici, ce problème est astucieusement contourné par le paramétrage des sources au stator par l'angle ψ [1], ce qui permet de conserver un modèle à faible coût calculatoire.

Ce circuit est accompagné d'un certain nombre d'équations analytiques permettant le calcul du couple. Notons qu'un modèle non-linéaire est utilisé pour représenter la satura-

tion dans les parties ferromagnétiques. Le couple statique est calculé à partir de plusieurs grandeurs :

— $\mathbb{X}_{me}$, les variables géométriques de la machine électrique :

→ 10 étaient initialement utilisées par V. Reinbold et ont été décrites au chapitre précédent sur la figure 2.12 ;

→ le nombre de pôles, noté p, nouvelle variable que nous allons intégrer.

— I_{ME}, le courant injecté au stator ;

— ψ, l'angle de commande .

Les symétries et périodicités qui existent pour la géométrie de la machine et la distribution électrique permettent de réduire le modèle à une unique paire de pôles. C'est le modèle le plus simple qu'il ait été possible de construire considérant l'état des outils de modélisation lors des travaux de V. Reinbold. Ainsi réduit, ce modèle nous permet d'envisager un travail pour une valeur p différente.

Néanmoins, les versions actuelles des outils nous ont permis de réduire ce modèle de moitié par la prise en compte de l'anti-périodicité. Ce travail a été mené lors du stage de Côme Dumont, que nous avons encadré. En effet, comme présenté sur la figure 3.4, il existe une anti-périodicité dans l'axe q de la machine. Cela s'explique par la direction opposée

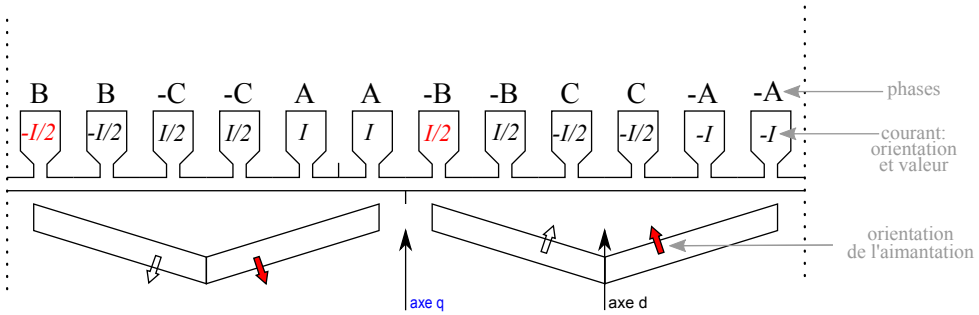


Figure 3.4. Représentation d'une paire de pôles de la machine. L'anti-périodicité des sources autour de l'axe q est mise en évidence en rouge. Dans cet exemple précis, l'angle de commande ψ vaut $-\pi/6$.

des sources (courant et aimantation) de deux pôles successifs. Une anti-périodicité est alors induite sur les flux magnétiques circulant dans la machine. Par exemple, et comme cela est illustré sur la figure 3.5, il existe l'égalité suivante sur les flux : $F_7 = -F_1$

Ainsi, le réseau de réluctances peut être réduit de moitié, ce qui est intéressant d'un point de vue calculatoire comme nous le verrons dans la sous-partie 3.3.2, notamment dans le cadre d'un problème d'optimisation. La réduction du modèle à un unique pôle nous permet toujours de travailler sur différentes valeurs du nombre de pôles.

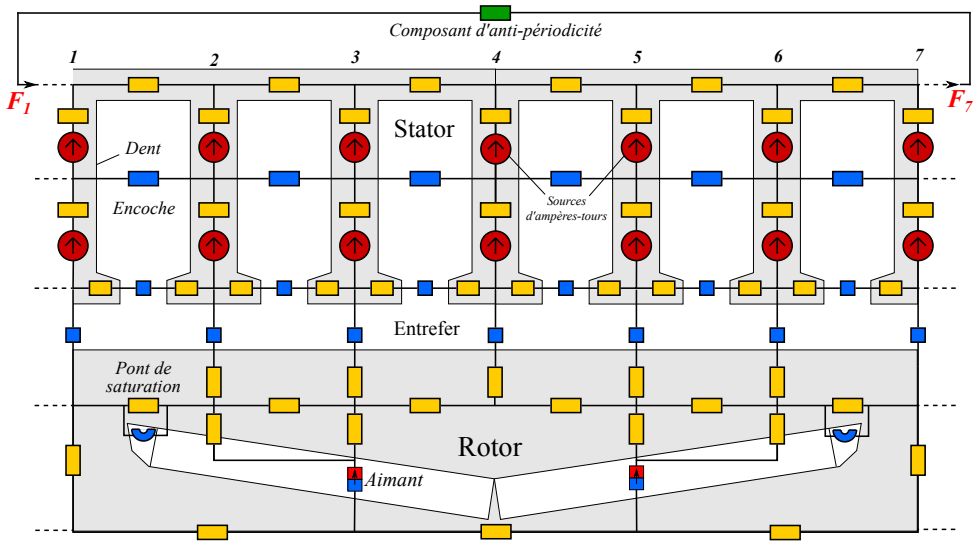


Figure 3.5. Modèle de la machine par réseau de réluctances. Le composant d'anti-périodicité (en vert) proposé par les outils de modélisation permet de réduire le modèle à un unique pôle. En rouge on retrouve les sources de flux magnétique, en jaune les réluctances associées aux zones de matériau magnétique, et en bleu les réluctances dans les zones d'air.

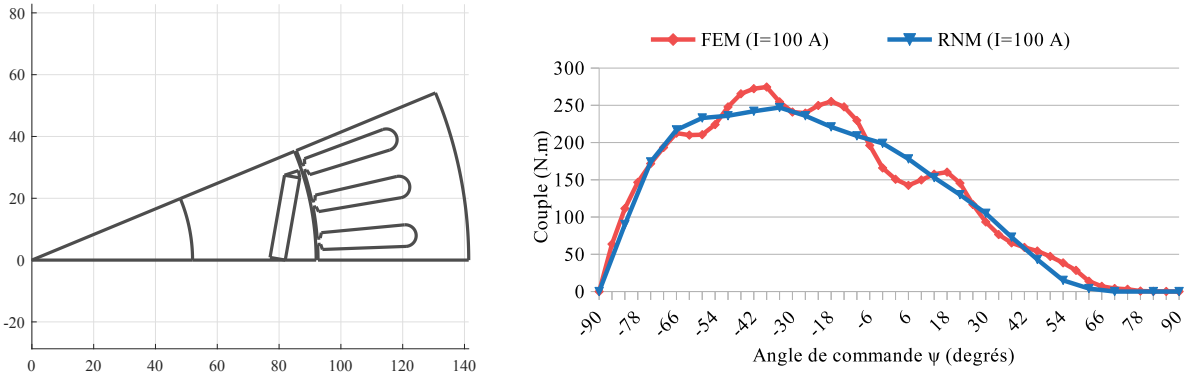
3.1.4. Validation par un modèle éléments finis

Le modèle par réseau de réluctances (que nous appellerons par la suite RNM pour *Reluctance Network Model*) a été conçu pour respecter les caractéristiques électromagnétiques de la machine dans le domaine de définition des variables qui la caractérisent.

Ainsi, le modèle doit permettre de représenter les chemins du flux magnétique dans la machine quelle que soit la valeur prise par ces variables. Ce travail a été fait par V. Reinbold dans le cadre de l'étude d'une machine à 8 pôles. Il s'agit de vérifier ici que le modèle est bien utilisable avec une autre valeur du nombre de pôles, et que les phénomènes physiques sont bien respectés.

Pour cela, nous réalisons des simulations sur un modèle par éléments finis (noté FEM pour *Finite Element Model*). De telles méthodes sont plus robustes que notre modèle semi-analytique notamment car le maillage est beaucoup plus fin et peut être adapté automatiquement à chaque géométrie. La mise en place et le calcul d'un modèle FEM est bien sûr plus couteux que pour un modèle RNM, ce qui le rend difficilement utilisable dans un processus d'optimisation comme le notre.

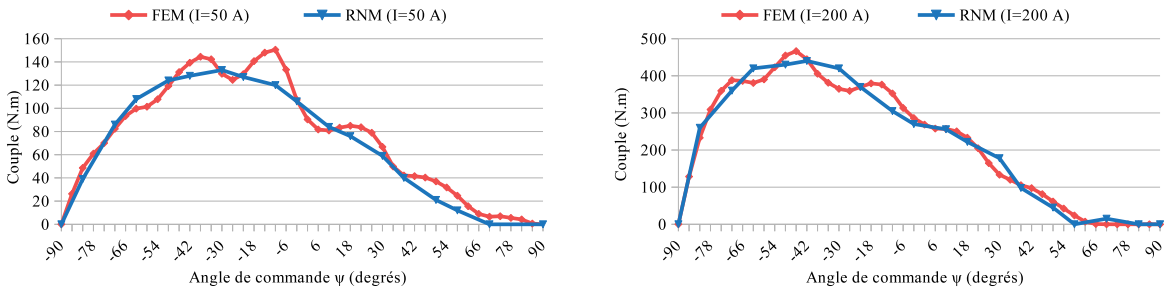
Dans un premier temps, nous nous assurons de retrouver des résultats cohérents pour la machine d'origine utilisée dans la Toyota Prius [34], représentée sur la figure 3.6(a). La figure 3.6(b) présente la valeur du couple statique de cette machine, calculée pas à pas, en fonction de l'angle de commande. Les modèles FEM et RNM sont ainsi comparés. D'autres grandeurs ont été comparées, telle que les pertes fer pour différents points de fonctionnement de la machine (*cf.* annexe D).



(a) Dessin de la machine (1/2 pôle) en millimètre. Sa profondeur est de 85 mm.

(b) Validation du couple : comparaison des modèles FEM et RNM. Le courant est fixé à 100 A

Figure 3.6. Validation du modèle électromagnétique. Exemple de la machine de la Toyota Prius II (8 pôles).



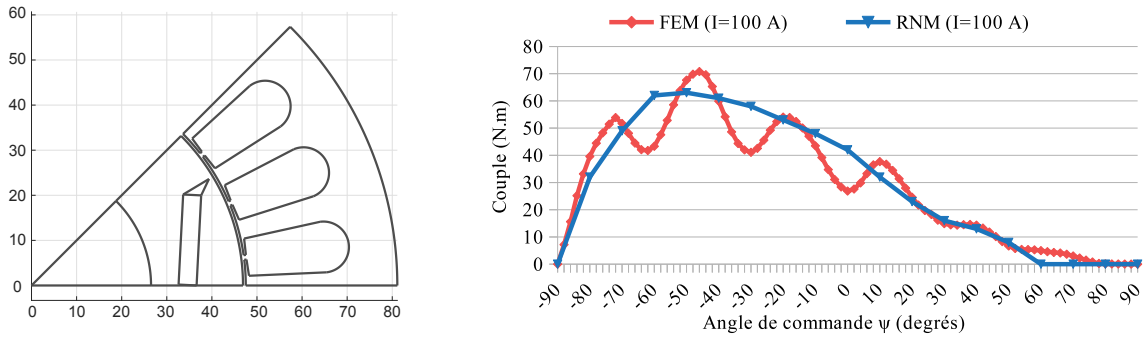
(a) Le courant est fixé à 50 A.

(b) Le courant est fixé à 200 A.

Figure 3.7. Validation du couple pour la machine initiale de la Prius (8 pôles) pour des courants de 50 et 200 A.

La même méthode est appliquée à une machine possédant 4 pôles. Cette machine n'a pas été choisie au hasard mais est en réalité issue du processus d'optimisation. Les résultats sont présentés sur la figure 3.8(b). Notons que dans chaque cas, le calcul est effectué sur une géométrie fixée et pour un courant I_{EM} de 100 A. Notons que ce travail a également été effectué pour des courants plus faible (50 A ; *cf.* figures 3.7(a) et 3.9(a)) et plus fort (200 A ; *cf.* figures 3.7(b) et 3.9(b)), ainsi que pour une autre valeur du nombre de pôles ($p = 12$), et qu'il mène à des observations similaires.

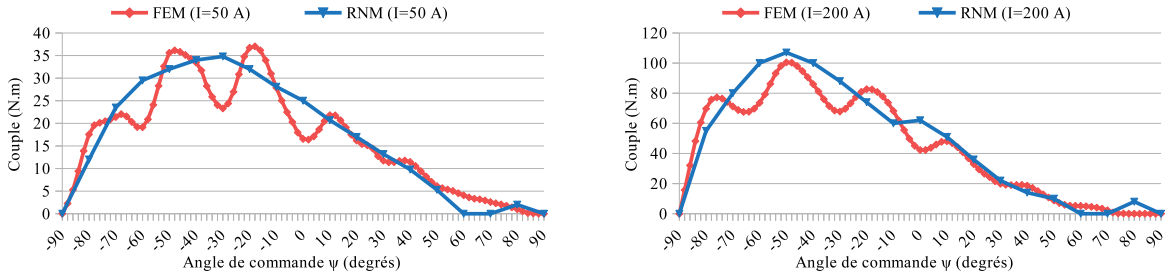
La première observation que l'on peut faire est la bonne tendance globale dans les deux cas du modèle RNM vis-à-vis du modèle par éléments finis. Néanmoins, nous remarquons une ondulation du couple sur ce dernier, qui n'est pas présente pour le modèle par réseau de réluctances. L'explication principale à cette différence est que le couple de détente n'est pas considéré dans le modèle réluctant. En effet, celui-ci est conçu pour calculer le couple moyen et non instantané.



(a) Dessin de la machine (1/2 pôle) en millimètre. Sa profondeur est de 127,45 mm.

(b) Validation du couple pour une machine à 4 pôles : comparaison des modèles FEM et RNM. Le courant est fixé à 100 A

Figure 3.8. Validation du modèle électromagnétique pour une machine à 4 pôles.



(a) Le courant est fixé à 50 A.

(b) Le courant est fixé à 200 A.

Figure 3.9. Validation du modèle électromagnétique pour une machine à 4 pôles (50 et 200 A).

On peut également remarquer que l'amplitude relative de l'ondulation de couple est renforcée pour la machine à 4 pôles. Nous mesurons effectivement que la proportion de l'amplitude de la seconde ondulation par rapport au couple maximal est d'environ 25% pour la machine à 8 pôles, et qu'elle grimpe à 40% pour la machine à 4 pôles. Ainsi, le modèle FEM est en moyenne très proche du modèle RNM, mais cette ondulation amène localement des différences notables.

Enfin, nous remarquons que pour un courant de 200 A, le modèle RNM a tendance à légèrement sur-évaluer le couple maximal dans la machine, notamment dans les cas $p = 4$ et $p = 12$. Mais ce point de fonctionnement est tout à fait extrême, avec une forte saturation du matériau magnétique, et la machine ne sera jamais utilisée dans de telles conditions.

Ainsi, nous retenons qu'en moyenne, le modèle RNM est en bon accord avec le modèle FEM. Cela permet de valider l'utilisation du réseau réluctant pour une valeur différente du nombre de pôles. Comme nous le verrons dans la sous-partie 3.2.1 pour la création de la cartographie de rendement, nous choisirons une commande qui maximise

(minimise) le couple en fonctionnement moteur (générateur). La partie suivante présente la méthode nous permettant de construire cette cartographie et de l'utiliser lors du processus d'optimisation avec un nombre de pôles variable. Les outils en jeu sont décrits dans l'annexe C.

3.2. Modélisation du système

3.2.1. Construction d'une cartographie de rendement

Dans cette sous-partie, nous présentons l'utilisation concrète du modèle RNM (intégré au composant logiciel MUSE) lors du processus d'optimisation global. Ce modèle nous permet d'obtenir les flux magnétiques circulant dans la machine, et donc le couple, à partir de la géométrie de celle-ci et de sa commande (courant, angle). Ainsi, nous aboutissons finalement aux pertes et donc au rendement de la machine. Tous ces calculs sont réalisés lors de la phase d'optimisation énergétique du véhicule.

Afin de réduire le temps de calcul lors de l'appel au modèle de la machine électrique, nous utilisons comme intermédiaire une cartographie de rendement dans le plan couple/vitesse. Un exemple en a été donné précédemment sur la figure 2.13. Comme nous le détaillerons plus loin dans la sous-partie 3.3.2, la création de ce modèle plus grossier pour chaque dimensionnement de machine nous permet d'accélérer la gestion énergétique du véhicule, et donc le processus complet d'optimisation.

La cartographie de rendement est construite suivant plusieurs étapes que nous détaillons ici :

— les ensembles de définition du courant I_{ME}, de l'angle de commande ψ et de la vitesse Ω_{ME} sont discrétisés. Le courant est contraint par des limitations d'ordre magnétique (désaimantation des aimants) et thermique (densité de courant maximale). L'angle de commande doit permettre un fonctionnement en mode moteur et générateur. Enfin, la vitesse maximale est limitée par le courant et la tension a priori disponible ;

— les champs et flux magnétiques sont évalués à partir du schéma réluctant pour l'ensemble des couples $\{I_{ME}, \psi\}$ précédemment définis. Cette résolution nécessite une méthode numérique : un algorithme de type Newton Raphson. Celui-ci est passé en revue dans [83] ;

— les tensions, les pertes, le couple moyen et le rendement sont obtenus en fonction de I_{ME}, ψ et de Ω_{ME} via des calculs matriciels ;

— les triplets $\{I_{ME}, \psi, \Omega_{ME}\}$ qui mènent à une tension supérieure à la valeur maximale sont considérés en dehors de la cartographie ;

— ψ est choisi pour chaque couple $\{I_{ME}, \Omega_{ME}\}$ afin de maximiser (minimiser) le couple en mode moteur (générateur) respectivement. Cela permet de définir les limites de couple ;

— la cartographie est finalement obtenue par une interpolation linéaire des pertes et du rendement pour un échantillonnage régulier de la vitesse et du couple.

Le calcul des pertes dans la machine est basé sur les hypothèses suivantes :

— les pertes dans les enroulements sont déduites du courant maximal I qui y circule et de la résistance R_s d'une phase au stator (effet Joule), comme décrit par l'équation 3.3.

$$P_j = \frac{3}{2} \cdot R_s \cdot I^2 \tag{3.3}$$

— tout comme le couple et les pertes par effet Joule, les pertes fer sont calculées au premier harmonique. L'induction B est supposée sinusoïdale et de fréquence f. C'est le modèle de Bertotti, décrit par l'équation 3.4, qui est utilisé.

$$P_f = p_h + p_c + p_e = k_h \cdot B_m^2 \cdot f + k_c \cdot B_m^2 \cdot f^2 + k_e \cdot B_m^{1.5} \cdot f^{1.5} \tag{3.4}$$

p_h, p_c et p_e représentent les pertes par hystérésis, par courants de Foucault et par excès respectivement. On leur associe les coefficients k_h, k_c et k_e dépendant du matériau magnétique utilisé. L'hypothèse du premier harmonique nous permet de négliger les pertes au rotor dans le matériau magnétique et les aimants. Ainsi, seules les pertes fer statoriques sont considérées.

— les pertes mécaniques sont assimilées à des frottements secs, fonction de Ω_{ME} et du rayon extérieur de la machine R_{ext} [84]. L'équation 3.5 présente le modèle utilisé, qui a été calé grâce aux mesures réalisées dans [34].

$$P_m = 0.8 \cdot \Omega_{ME} \cdot \left(\frac{R_{ext} \cdot 10^3}{0.282} \right)^2 \tag{3.5}$$

Ainsi définie, la cartographie permet d'avoir accès au rendement de la machine de manière relativement précise et dans un temps tout à fait acceptable pour un processus de dimensionnement par optimisation. Cela est directement lié à la discrétisation que l'on choisit d'appliquer au début du processus. Concernant la précision, notons que la cartographie obtenue pour la machine initiale de la prius, à partir du schéma réluctant, présente moins de 2% d'erreur par rapport à la cartographie issue de mesures réelles présentée dans [36].

Afin de réaliser une simulation complète du système, la cartographie est associée à un ensemble de modèles des autres composants du véhicule, présentés dans la sous-partie suivante.

3.2.2. Modélisation du véhicule

Le modèle de VEH utilisé est décrit sous VEHlib [78], une librairie Matlab/Simulink développée à l'IFSTTAR afin de simuler notamment le comportement de véhicules hybrides. Nous utiliserons dans ce chapitre et le suivant un véhicule doté d'une architecture hybride parallèle à deux embrayages, rappelée par la figure 3.10. La méthodologie reste toutefois adaptée à d'autres architectures.

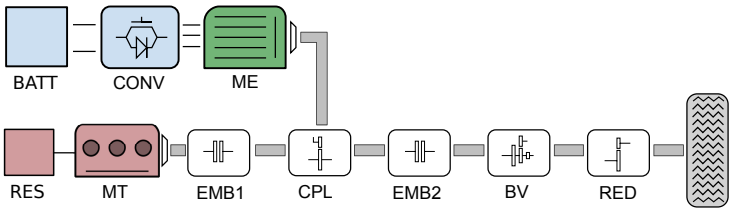


Figure 3.10. Architecture hybride parallèle à deux embrayages.
BATT : batterie, CONV : convertisseur statique AC/DC, ME : machine électrique, RES : réservoir, MT : moteur thermique, EMB : embrayage, CPL : coupleur, BV : boîte de vitesse, RED : réducteur.

VEHlib permet notamment des simulations dont la causalité est inversée (dite "backward"), ce qui permet d'obtenir la consommation de carburant d'un véhicule à partir de son dimensionnement, de la vitesse imposée aux roues (mission) et de la gestion d'énergie appliquée.

En plus des variables de dimensionnement de la machine électrique que nous avons décrites dans les parties 2.3.4 puis 3.1, le modèle complet du véhicule comporte 5 variables supplémentaires notées $\mathbb{X}_{vh}$, que nous rappelons ici :

— N_{bat}, le nombre de modules dans la batterie ;

— U_{bus}, la tension continue du convertisseur statique ;

— P_{mt}, la puissance du moteur thermique ;

— k_{cpl}, le rapport de réduction de couplage ;

— k_{red}, le rapport de réduction du réducteur de vitesse.

Pour chacun des composants du véhicule autres que la machine, voici la modélisation qui est utilisée :

— concernant l'ensemble électrique :

→ la batterie est représentée par un modèle analytique simple. Le pack est assimilé à une source de tension en série avec une résistance interne, variable selon le sens du courant. Les variables principales sont I_{bat}, le courant débité, et U_{bat} la tension aux bornes du pack ;

→ un convertisseur DC/DC, supposé parfait, est inséré entre la batterie et le convertisseur AC/DC. Il transforme la tension U_{bat} vers la tension U_{bus} ;

→ le convertisseur AC/DC est représenté via un modèle analytique classique. Les pertes par conduction et commutation dans les diodes et les IGBT sont considérées. La modulation de largeur d'impulsion (MLI) intersective est utilisée pour générer les signaux de commandes ;

— concernant l'ensemble thermique :

→ le moteur thermique est représenté par une cartographie de consommation spécifique (*cf.* figure 3.11). Nous considérons ici un moteur diesel de type K9K (1,5 L) d'une puissance maximale de 54,5 kW. Cette cartographie a été mesurée sur le banc expérimental de l'IFSTTAR [85] ;

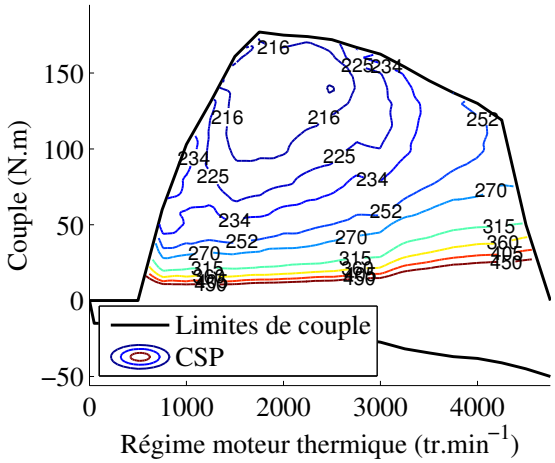


Figure 3.11. Cartographie de consommation spécifique (CSP) du moteur thermique initial [1]. La CSP (exprimée en $g \cdot\ kW^{-1} \cdot\ h^{-1}$) est une grandeur instantanée équivalente à l'inverse du rendement du moteur thermique : une forte CSP est synonyme de faible rendement. Elle correspond à la masse de carburant consommé pour fournir 1 $kW \cdot h$ mécanique sur l'arbre du moteur.

— concernant l'ensemble mécanique :

→ la transmission mécanique est représentée par un modèle analytique à rendement constant ;

→ le comportement aérodynamique du véhicule est décrit grâce à un modèle classique prenant en compte la force de traînée et la résistance au roulement. Ce modèle a également été validé sur le banc de l'IFSTTAR [37].

3.3. Optimisation sur cycle de fonctionnement et analyse

Nous venons de passer en revue l'ensemble des modèles et outils que nous utilisons afin de simuler le fonctionnement du véhicule hybride. Cette partie se concentre sur l'optimisation du système complet. Dans un premier temps, nous présentons la méthode utilisée pour intégrer la nouvelle variable de dimensionnement. Ensuite, nous analyserons les résultats d'optimisation et l'influence de cette variable.

3.3.1. Optimisation d'une variable discrète par NSGA-II

Jusqu'ici, par rapport au travail de V. Reinbold, nous avons introduit une nouvelle variable de la machine électrique : le nombre de pôles. A priori, nous avons souligné son influence sur la machine (fonctionnement, encombrement) et donc sur le système dans sa globalité. Nous cherchons à présent à utiliser cette variable dans le processus d'optimisation introduit au chapitre 2.

D'un point de vue mathématique, l'intégration de cette variable apporte une discontinuité au problème. En effet, p est une variable entière paire. Cette discontinuité nécessite la modification de l'algorithme NSGA-II qui, tel que décrit dans [59], n'y est pas adapté.

Nous considérerons ici un ensemble fini de valeurs que pourra prendre cette variable. Cet ensemble, défini autour de la valeur de la machine de référence (8 pôles), est le suivant :

$$p \in \{2\ ;\ 4\ ;\ 6\ ;\ 8\ ;\ 10\ ;\ 12\}$$

Différentes approches semblent se dégager comme la méthode de l'arrondi [86] ou celle de la pénalisation [87] afin d'introduire la variable discrète p au problème :

— *méthode de l'arrondi* : p est définie comme une variable continue, contrainte entre les valeurs extrêmes 1 et 13. Lors de l'initialisation et de l'évolution des individus, la fonction *round* de Matlab est utilisée pour obtenir une valeur entière ;

— *méthode de la pénalisation* : de la même manière, p est définie comme une variable continue sur l'intervalle $[1\,;\,13]$. Une pénalisation de la forme $abs(100 \cdot \sin(\pi \cdot pp))$ est appliquée. Les individus présentant un nombre de pôles qui n'est pas un entier pair reçoivent ainsi une pénalité sur leur consommation, et sont donc naturellement éliminés au fil des générations.

Ces méthodes permettent de traiter cette variable de la même manière que les variables continues qui étaient déjà présentes dans le problème. Néanmoins, nous n'avons

pas abouti à ce jour à des résultats concluants grâce à celles-ci. Notamment, pour plusieurs lancements successifs de l'optimisation, l'algorithme ne s'oriente pas toujours vers des solutions possédant la même valeur pour p. Or, comme nous le verrons dans la sous-partie 3.3.3, ce sont les solutions $p = 4$ et $p = 6$ qui semblent se dégager lorsque l'on utilise une méthode séquentielle (résolution successive pour chacune des valeurs pouvant être prises par p).

Cela peut s'expliquer par l'influence de ces méthodes sur l'élitisme des solutions. En effet, la probabilité d'évoluer (par un croisement ou une mutation) d'une bonne solution à une autre possédant un nombre de pôles différent est très faible. Cela est dû aux fortes différences structurelles observées entre ces solutions (*cf.* sous-partie 3.3.4). Ainsi, l'algorithme semble rester bloqué sur certaines solutions (une certaine valeur de p) à un moment donné de l'optimisation.

L'augmentation de la proportion de mutations dans le processus d'évolution semble améliorer le fonctionnement de ces méthodes mais n'est pas suffisant. Un allongement du processus d'optimisation (augmentation du nombre de générations et/ou du nombre d'individus) est une solution envisageable afin de progresser vers les solutions optimales. Une reformulation du problème en termes de proportions (proportion de surface de l'aimant, de concentration de flux, etc.) pourrait également être une alternative permettant de résoudre cette difficulté liée à l'élitisme des solutions.

Les résultats présentés par la suite ont été obtenus grâce à une méthode séquentielle, c'est-à-dire par la résolution successive du problème pour chacune des valeurs discrètes qui peuvent être prises par la variable p. Ainsi, le problème discontinu est remplacé par 6 problèmes continus. Pour chacune des valeurs, l'optimisation est réalisée pour les 15 autres variables du problème, comme cela est décrit sur la figure 3.12. Simple à mettre en place, cette méthode a tout de même un inconvénient principal qui est de multiplier par 6 le temps global d'optimisation puisque l'on considère 6 problèmes disjoints. Un ordre de grandeur des temps de calcul sur PC sera donné dans la sous-partie 3.3.2. Une résolution complète durera au moins 12 h avec le PC le plus performant à notre disposition et pour les réglages présentés dans le tableau 3.1.

Nous donnons maintenant quelques détails sur le processus itératif suivi par l'algorithme génétique. Plus de précisions sont fournies dans l'annexe A. Après l'initialisation d'une population aléatoire de véhicules hybrides,

— les individus sont évalués selon les objectifs. Ils obtiennent un rang et un indice de proximité (*crowding distance*) ;

— une partie de la population est sélectionnée via un tournoi basé sur le principe de non-domination (les individus de rang faible et avec un indice de proximité élevé sont privilégiés) ;

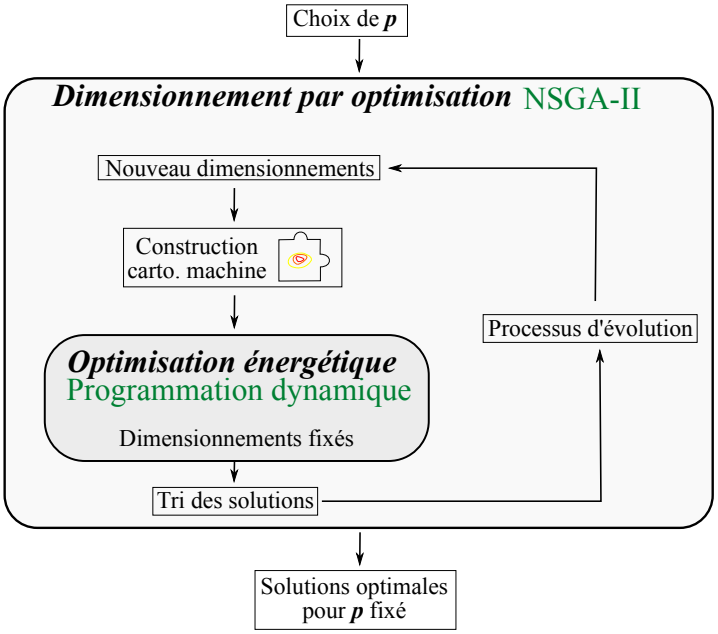


FIGURE 3.12. Processus d'optimisation lancé pour chacune des valeurs possibles pour p.

— les individus sélectionnés subissent un processus d'évolution : un croisement (dans 90% des cas (*cf.* tableau 3.1)) ou une mutation (10%) leur est appliquée pour maintenir la diversité dans la population. Les individus résultants sont appelés enfants (*offspring population*) ;

— une nouvelle population est établie à partir de la population initiale et des enfants. Ils sont comparés sur le principe de non-domination.

Nous choisissons d'utiliser les paramètres de réglages de l'algorithme tels que présentés dans le tableau 3.1, par rapport à notre propre expérience du problème. Ils nous permettent d'obtenir un bon compromis entre précision sur l'optimum et temps de calcul. Des détails supplémentaires sur le fonctionnement et le réglage de l'algorithme sont donnés dans l'annexe A.

Tableau 3.1. Réglages de l'algorithme NSGA-II.

Paramètre	Notation	Valeur
Taille de la population	N_{ind}	100
Nombre de générations	N_{gen}	200
Taux de croisement/mutation	τ_x/τ_m	90%/10%

En effet le nombre de générations N_{gen} permet de mettre fin au processus. Plus sa valeur est importante, plus l'optimisation sera proche des optimums. D'un autre côté, le nombre d'individus N_{ind} influence le brassage génétique (diversité dans la population). Mais lorsque ces deux paramètres augmentent, le temps de calcul devient naturellement

plus conséquent. D'autres paramètres permettent le réglage de l'algorithme (taille et type des tournois, taille de la population sélectionnée, etc.), mais ils sont moins influents que ceux présentés par le tableau 3.1.

3.3.2. Bilan quant au temps de calcul

Afin de pouvoir réaliser ces optimisations dans un temps acceptable, de nombreuses méthodes ont été présentées au cours de ce chapitre. Tout d'abord, nous utilisons un modèle semi-analytique de la machine. Comme cela est présenté par le tableau 3.2, un calcul simple est près de 1000 fois plus rapide avec ce type de modèle qu'avec un modèle de type éléments finis. Nous avons également réduit ce modèle au maximum (1 pôle) grâce aux outils à notre disposition. Cela a permis de diviser par deux le temps de calcul par rapport au modèle précédemment considéré.

Une cartographie de rendement est également utilisée lors du processus d'optimisation. Elle permet d'accélérer l'optimisation énergétique du véhicule. En effet, l'algorithme de programmation dynamique fait appel environ 20 000 fois au modèle complet du véhicule lors de cette étape. Cela dépend de la discrétisation qui est choisie (0.05% sur le SoC et 1 s en temporel dans notre cas).

Ainsi, un appel direct au modèle RNM lors de l'optimisation énergétique nécessiterai environ 180 secondes (pour 20 000 appels) pour chaque individu. La construction d'une cartographie de rendement prend 4,4 secondes environ (800 appels au modèle RNM) et en contrepartie, le temps nécessaire pour faire 20 000 appels à une telle cartographie est minime. Donc la construction de ce modèle intermédiaire permet un gain de temps considérable lors de l'optimisation énergétique du véhicule. Il faut toutefois nuancer cela par une légère perte de précision due aux interpolations pour créer la cartographie et en extraire des valeurs.

En résumé, pour chaque individu, la création de la cartographie nécessite 4,4 s et la résolution de la gestion énergétique qui y fait appel dure 4 s environ.

3.3.3. Impact sur le dimensionnement et le fonctionnement global du véhicule

Nous mettons maintenant en œuvre le processus d'optimisation précédemment défini. L'influence de la nouvelle variable de dimensionnement de la machine est analysé. Dans un premier temps nous nous intéressons aux résultats obtenus pour le véhicule dans sa globalité. Nous analyserons l'influence de p sur les objectifs de l'optimisation, le dimensionnement du véhicule et son fonctionnement. Nous rappelons que le processus d'optimisation a été appliqué à un véhicule hybride constitué à partir d'une architecture

Tableau 3.2. Comparaison des temps de calcul pour les différents modèles développés et les différents niveaux de calcul lors de l'optimisation.

Modèle utilisé	**Type de calcul**[1]		
	calcul simple[2]	cartographie de rendement	processus d'optimisation[3]
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

1. Les calculs ont été effectués sur un même PC (processeur i7-4710MQ @ 2,50 GHz, 16 GB RAM, Windows 7 Pro, 64 bits). Le calcul parallèle sur 6 threads est utilisé pour le processus d'optimisation.
2. C'est un appel simple au modèle. Dans le cas du modèle par éléments finis, le temps consacré au maillage du domaine n'est pas pris en compte dans la valeur affichée. Il est de l'ordre de quelques minutes pour le maillage fin que nous considérons.
3. La valeur affichée est le temps mis par le processus pour résoudre le problème pour une valeur de p donnée. Les paramètres utilisés pour l'algorithme NSGA-II sont ceux présentés par la table 3.1. Le cycle de conduite utilisé est le cycle Hyzem urbain, dont la durée est de 531 s.

hybride parallèle à deux embrayages. Le cycle de fonctionnement utilisé est le cycle Hyzem urbain [38].

Les résultats globaux sont présentés sur la figure 3.13 sous forme de fronts de pareto. Chaque axe de cette figure représente un objectif de l'optimisation. Chaque point correspond à une solution optimale d'un point de vue multi-objectif, c'est-à-dire non-dominée (*cf.* annexe A). La couleur des points fait référence à la valeur prise par p lors de l'optimisation. Le véhicule de référence, qui rappelons-le n'est pas optimisé, est constitué d'une machine à 8 pôles.

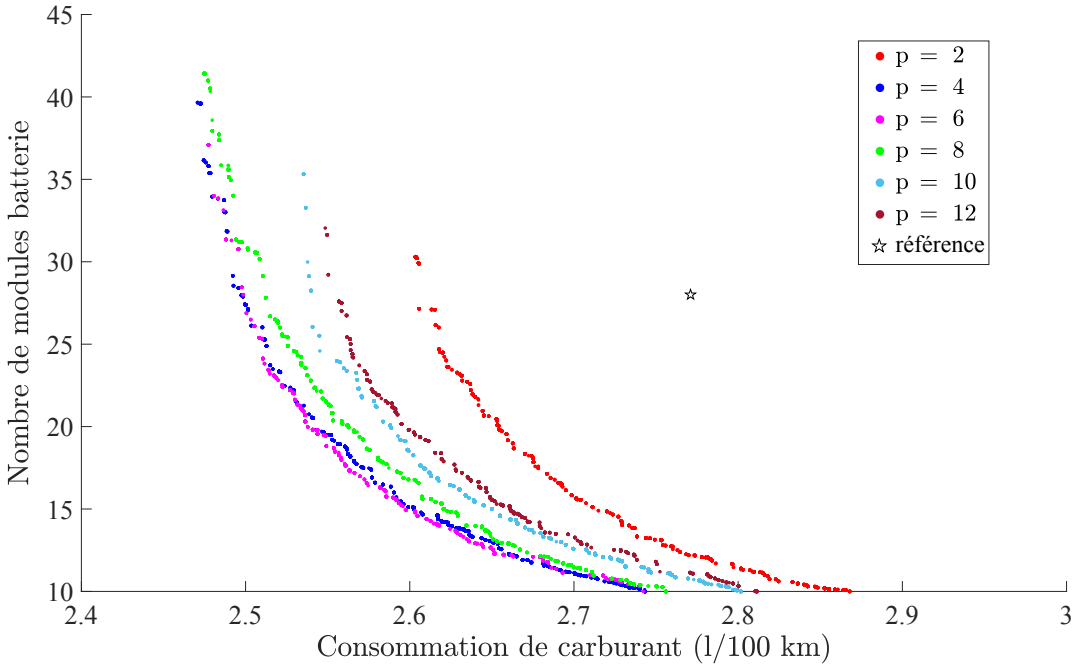


Figure 3.13. Comparaison des fronts de pareto obtenus pour les différentes valeurs de p.

Tout d'abord, nous remarquons le gain apporté par le processus d'optimisation quelle que soit la valeur de p par rapport à la référence. C'est notamment le cas pour les véhicules embarquant une machine à 8 pôles (en vert). Un gain de 10% sur la consommation est observé pour le véhicule optimal embarquant le même nombre de modules de batterie que le véhicule de référence, soit 28.

Ce sont les véhicules embarquant une machine à 4 ou 6 pôles qui mènent aux meilleurs résultats, avec un gain supplémentaire de 1 point, soit environ 11% par rapport à la référence. En ce qui concerne les autres valeurs de p (2, 10 et 12), la consommation des véhicule obtenus est légèrement moins bonne, mais toujours inférieure à celle du véhicule de référence. Notons que dans le cas $p = 2$, des machines de certains véhicules sur le front de pareto ne sont géométriquement pas réalisables : les aimants peuvent déborder sur une partie non autorisée du rotor. Les contraintes géométriques ne sont pas assez fortes dans ce cas là et l'on arrive de toute façon à la limite du modèle RNM (le flux n'est plus concentré par les aimants). Pour les cas $p = 10$ et $p = 12$, la dégradation des solutions par rapports à $p = 6$ est probablement due à l'arrivée en butée de la variable k_{cpl} sur sa valeur basse : 0,4 (*cf.* tableau 3.3). En relâchant cette contrainte, on obtiendra surement des solutions avec des consommations plus faibles dans ces deux cas.

Au premier abord, on observe donc seulement des gains marginaux apportés par cette nouvelle liberté pour le système. Notamment, pour un véhicule embarquant 28 modules dans la batterie, nous notons des différences n'excédant pas 2,5 points sur la consommation (gain par rapport à la référence), lorsque p prend ses différentes valeurs de 4 à 12.

Ces résultats sont à prendre avec précautions, notamment vis-à-vis de la précision des modèles, de leurs limites d'utilisation, et de l'aspect aléatoire de l'algorithme génétique. De plus, il existe des différences d'un individu à son voisin sur les fronts de pareto. Ainsi, ce qui ressort pour les véhicules embarquant 28 modules de batterie, n'est pas nécessairement vrai pour un véhicule dans son voisinage.

Concernant le dimensionnement du véhicule, le tableau 3.3 synthétise les valeurs obtenues pour chacune des variables clés du véhicule. Les véhicules comparés possèdent tous 28 modules de batterie. L'impact sur la géométrie de la machine électrique sera détaillé dans la sous-partie 3.3.4. On remarque ici deux effets principaux de la liberté apportée par la variable p au système :

— une diminution de la puissance de la machine lorsque p augmente ;

— une diminution du rapport de couplage d'un rapport 5 dans le même temps.

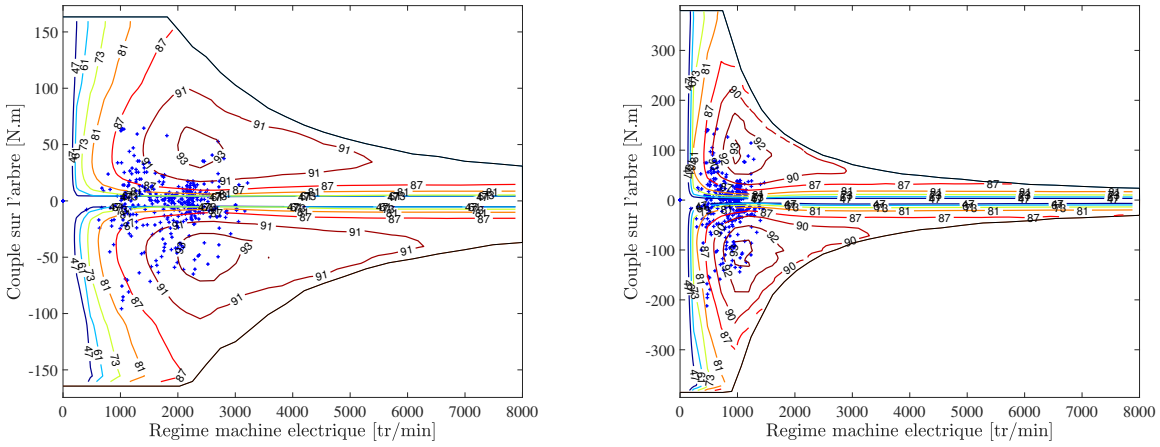
Comme nous l'avons vu, ces variations ne mènent pas à de grandes différences du point de vue de l'efficacité du véhicule puisque les écarts de consommation restent faibles. Toutefois, il existe des différences dans le fonctionnement du véhicule, et notamment pour la machine électrique.

Tableau 3.3. Dimensionnements optimaux de véhicules embarquant environ 28 modules batteries (soit 1,47 kWh et 29,4 kW).

p	$P_{me}^{meca\ 1}$ (kW)	U_{bus} (V)	P_{mt} (kW)	k_{cpl}	k_{red}
2	39,8	201,7	28,7	1,92	2,69
4	33,3	203,7	28,3	1,29	2,76
6	31,2	200,2	28,2	0,7	2,63
8	31,3	260,5	29,1	0,59	2,76
10	27,5	200	29,5	0,4	2,65
12	28	273,3	30,6	0,4	2,62

1. Puissance mécanique maximale de la machine.

On observe les meilleures performances de l'association convertisseur/machine (ACM) lorsque p vaut 4, 6 ou 8. Dans ces cas là, le rendement de l'ACM atteint en moyenne 87% pendant les phases de traction et 89% pendant les phases de récupération. Pour cela, la variation du rapport de couplage k_{cpl} est primordiale puisqu'elle permet d'adapter la vitesse à la meilleure zone de rendement de la machine. Comme cela est illustré sur les figures 3.14(a) et 3.14(b), le système réussit à s'adapter à la valeur de p : la gestion de l'énergie et le rapport de couplage sont notamment ajustés pour que la chaîne de traction électrique puisse travailler avec une bonne efficacité.



(a) Points de fonctionnement (croix bleues) d'une machine à 4 pôles dans un système optimal avec 28 modules de batteries.

(b) Points de fonctionnement (croix bleues) d'une machine à 8 pôles dans un système optimal avec 28 modules de batteries.

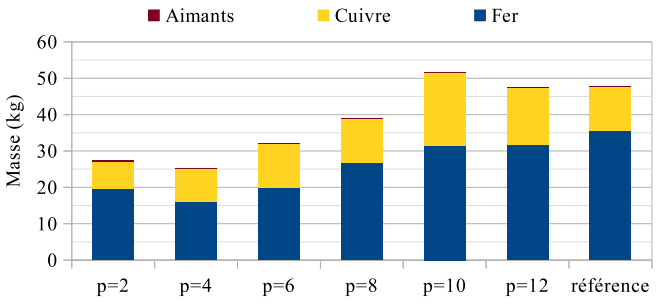
Figure 3.14. Représentation des points de fonctionnement de la machine électrique sur la cartographie de rendement de l'association convertisseur/machine.

Finalement, puisque la valeur de p ne semble pas avoir une grande influence sur la consommation du véhicule, on pourrait décider de la choisir afin d'obtenir un rapport de réduction de couplage k_{cpl} proche de 1. Cela permettrait de supprimer le composant de couplage dans l'architecture et donc les pertes mécaniques dont il est à l'origine.

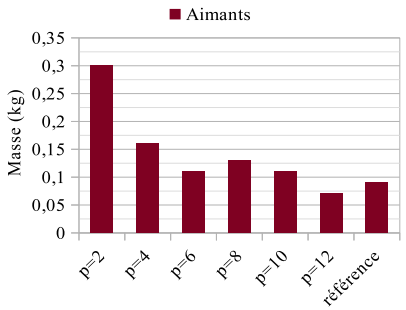
3.3.4. Impact sur l'encombrement de la machine

Nous tenons à rappeler que dans ce travail, nous ne cherchons pas à optimiser la machine électrique, mais bien le système dans sa globalité. Ainsi, les machines obtenues ont des caractéristiques bien différentes d'un système à l'autre (ex : géométrie, fonctionnement, puissance, etc.). Il est important de garder cela à l'esprit lors des comparaisons à venir.

Un résultat intéressant concerne la masse et le volume des machines intégrées aux véhicules obtenus par optimisation. En effet, comme illustré sur la figure 3.15(a), dans le cas de véhicules embarquant 28 modules de batterie, il semble que la masse des machines résultantes soit réduite lorsque le nombre de pôles fixé en début d'optimisation décroit. Il en va de même concernant les quantités de cuivre et de fer, mais c'est l'inverse pour la masse d'aimants (*cf.* figure 3.15(b)). Notons que la masse des têtes de bobines est prise en compte dans la masse de cuivre.



(a) Masse totale de la machine.



(b) Détail de la masse d'aimant.

Figure 3.15. Comparaison de la masse des machines électriques obtenues dans des véhicules appartenant au front de pareto à 28 modules de batterie, et pour les différentes valeurs de p.

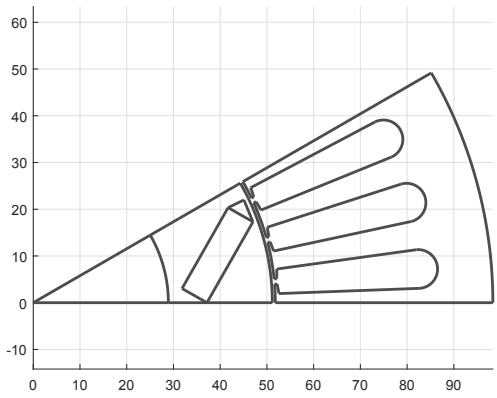
Ce constat peut paraître contre intuitif au premier abord. En effet, comme le décrit par exemple [88], la masse des machines a tendance à décroître avec le nombre de pôles. Néanmoins, ces résultats sont souvent obtenus lors d'une comparaison à puissance, vitesse, profondeur et/ou rayon externe identiques. Comme présenté dans [75] ou [76], l'augmentation du nombre de pôles mène à une réduction du flux magnétique qu'ils produisent, et donc à la possibilité de réduire l'épaisseur des dents et des culasses et au raccourcissement des encoches.

Dans notre étude, ni la puissance, la profondeur ou le diamètre ne sont considérés constants en cours d'optimisation. La réduction du nombre de pôles permet à l'ACM de fonctionner à un bon rendement à des vitesses plus élevées. Pour une même puissance demandée à la machine, le couple est donc moindre dans ces zones de fonctionnement. Le couple étant notamment proportionnel au volume du rotor [77] (tout comme au courant linéique d'induit et à l'induction dans l'entrefer), ce dernier peut être réduit.

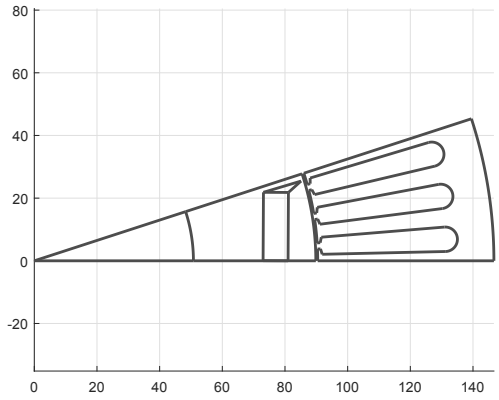
L'optimisation mène à des géométries de machine bien différentes, comme nous pouvons l'observer grâce aux figures 3.16(a) (6 pôles) et 3.16(b) (10 pôles) :

— lorsque $p \leq 8$, les machines sont profondes et de diamètre réduit ;

— lorsque $p > 8$, c'est l'inverse : les machines sont courtes et avec un diamètre important.



(a) Dessin en millimètre (1/2 pôle) de la machine à 6 pôles obtenue pour un système optimal. Sa profondeur active (hors têtes de bobine) est de 111,6 mm.



(b) Dessin en millimètre (1/2 pôle) de la machine à 10 pôles obtenue pour un système optimal. Sa profondeur (hors têtes de bobine) est de 77,1 mm.

Figure 3.16. Comparaison des géométries de machines à 6 et 10 pôles dans un véhicule optimal à 28 modules de batterie.

Cette tendance a déjà été analysée dans [75]. Nous résumons les caractéristiques principales des machines obtenues dans le tableau 3.4. On y retrouve bien ce changement de structure géométrique pour les machines à 10 et 12 pôles. On peut imaginer que dans ce dernier cas la vitesse de base aurait pu être encore plus faible si k_{cpl} n'avait pas atteint sa limite basse, soit 0,4 (voir tableau 3.3), imposée lors de l'optimisation.

Tableau 3.4. Caractéristiques des machines embarquées dans les véhicules optimaux à 28 modules batteries.

p	$RAD1$ / R_{ext}[1] (mm)	PROF (mm)	Ω_b $(tr \cdot min^{-1})$	puissance massique (kW/kg)
2	46 / 85	126,7	4 200	1,6
4	46,9 / 80,9	127,4	2 030	1,42
6	51,2 / 97,5	111,6	900	1,04
8	51,2 / 107,5	117,4	740	0,85
10	89,8 / 145,2	77,1	450	0,64
12	98,4 / 149,7	69,9	450	0,69

1. Rayon externe de la machine.

Nous avons donc observé ici que, malgré sa faible influence sur la consommation de carburant du VEH, le nombre de pôles considéré mène à des machines aux géométries et performances bien différentes. Nous constatons en particulier une diminution de la masse de la machine dans les véhicules obtenus par optimisation lorsque p décroît.

3.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons intégré une nouvelle variable au problème d'optimisation : le nombre de pôles de la machine électrique. Cela nous a permis d'illustrer concrètement le processus global de dimensionnement.

Le nombre de pôles est un paramètre de premier ordre pour la machine. Par définition, il influence la géométrie (nombre d'encoches total, ouverture angulaire des pôles) et le fonctionnement de celle-ci puisqu'il joue le rôle de rapport de réduction électromécanique.

Son intégration au problème d'optimisation est complexe car c'est une variable discrète. Nous avons utilisé une approche séquentielle (application du processus d'optimisation pour chaque valeur possible de p) dans un premier temps. Des méthodes du type *arrondi* et *pénalisation* ont été étudiées mais n'ont pas encore abouti à des résultats convaincants. La réduction du modèle de la machine à un unique pôle par anti-périodicité et l'utilisation d'une cartographie de rendement nous permettent toutefois de réaliser l'ensemble des calculs dans un temps correct.

Nous observons que cette nouvelle variable a un impact relativement faible sur la consommation de carburant sur cycle du véhicule (le cycle Hyzem urbain a été utilisé ici). Les VEH embarquant des machines avec 4, 6 ou 8 pôles mènent aux meilleurs résultats, avec un gain de 10% environ par rapport au véhicule hybride de référence, qui rappelons-le n'a pas un dimensionnement optimisé. Cela s'explique par l'adaptation du système à l'évolution structurelle de la machine. Malgré des géométries et des plages de fonctionnement à bon rendement très différentes, l'association convertisseur/machine est toujours utilisée efficacement. C'est la modification du rapport de couplage k_{cpl} entre les chaînes de traction thermique et électrique qui permet d'adapter lors du fonctionnement la vitesse du rotor à la vitesse de base de la machine.

Finalement, nous observons dans les systèmes obtenus par optimisation des machines plutôt allongées lorsque p est faible et plates avec un entrefer plus éloigné du centre dans le cas contraire. Il semble que la masse totale de la machine soit réduite avec le nombre de pôles. Notons toutefois une augmentation de la masse d'aimants dans le même temps.

Ce chapitre nous a permis d'introduire concrètement le processus global d'optimisation appliqué au véhicule hybride. Nous avons pu tirer un certain nombre de conclusions quant à l'influence de la variable p sur le dimensionnement et le fonctionnement du système complet.

CHAPITRE 4

Modélisation et influence des phénomènes thermiques dans la machine électrique

Contenu

4.1. Phénomènes thermiques dans la machine électrique 80
4.1.1 Description du problème et enjeux 80
4.1.2 État de l'art et choix d'une approche 83
4.2. Régions complexes pour l'analyse thermique des machines . . . 85
4.2.1 Les interfaces entre composants solides 85
4.2.2 L'écoulement autour des têtes de bobine 86
4.2.3 Les bobinages 86
4.2.4 L'entrefer 87
4.3. Construction d'un modèle de référence par éléments finis . . . 88
4.3.1 Description de la machine 89
4.3.2 Construction du modèle 90
4.3.3 Analyse des résultats 92
4.4. Construction d'un modèle par réseau de résistances 94
4.4.1 Description théorique 95
4.4.2 Construction du réseau complet 97
4.4.3 Comparaison des modèles LPTN et FEA 102
4.4.4 Validation du modèle LPTN 102
4.5. Incertitude et sensibilité des paramètres thermiques 107
4.5.1 Paramètres étudiés et plages de variation 107
4.5.2 Méthode des plans d'expériences appliquée au modèle FEM 108
4.5.3 Analyse du modèle LPTN 110
4.6. Intégration et influence de la contrainte thermique 116
4.6.1 Méthode d'intégration et influences 116
4.6.2 Impact sur le dimensionnement et le fonctionnement global 118
4.7. Conclusion 121

L'étude d'un système technologique comme le notre est fortement multi-physique. Les travaux de Vincent Reinbold se sont avant tout concentrés sur la modélisation électromagnétique de la machine électrique. Cette étape est nécessaire puisqu'elle permet de traduire le transfert d'énergie entre la batterie et le reste du système. Toutefois, ce n'est pas le seul comportement physique qui entre en jeu lors du fonctionnement de la machine. Notamment, il faut s'assurer que les échauffements induits par les pertes ne soient pas destructeurs. Pour cela, il est nécessaire d'extraire la chaleur qui est générée lors de l'utilisation du véhicule et/ou de limiter le fonctionnement de la machine afin de ne pas l'échauffer excessivement. Une bonne compréhension des échanges thermiques pourra nous conduire à des machines plus efficaces et performantes, et dont la durée de vie sera allongée. Cela profitera aux performances globales du véhicule.

Dans un premier temps, la partie 4.1 nous permettra d'entrer plus en détails sur la problématique de la modélisation thermique des machines électriques. Après avoir passé en revue l'état actuel de la recherche à ce sujet, nous présenterons notre approche afin d'obtenir un modèle thermique pour l'optimisation. À l'image de l'étude électromagnétique, nous utiliserons un modèle par éléments finis afin de cerner les principaux phénomènes dans la machine (*cf.* partie 4.3), à partir duquel nous construirons un modèle analytique plus rapide (*cf.* partie 4.4).

Dans la partie 4.5, nous étudierons la sensibilité de plusieurs paramètres thermiques incertains. La méthode des plans d'expériences et une analyse basée sur la variance (indices de Sobol) seront utilisées.

Enfin, nous intégrerons la contrainte thermique faisant appel au modèle analytique dans le processus global d'optimisation, et son impact sera analysé dans la partie 4.6.

4.1. Phénomènes thermiques dans la machine électrique

4.1.1. Description du problème et enjeux

L'étude des phénomènes thermiques dans les machines électriques est souvent délaissée en phase de dimensionnement vis-à-vis de l'étude électromagnétique. Néanmoins, ces deux phénomènes physiques sont interdépendants. Une attention particulière au dimensionnement thermique de la machine pourra permettre une amélioration significative des performances de celle-ci, en termes d'efficacité et de durée de vie. Cela pourra se traduire par une gestion énergétique différente au sein du véhicule.

4.1.1.1. Enjeux de la modélisation thermique de la machine

De nombreuses limitations [89] apparaissent lorsque l'on considère les échauffements dans la machine :

— la tenue des enroulements en cuivre ;

— la durée de vie des roulements ;

— la perte de performance des aimants, voire leur démagnétisation ;

— la surchauffe du carter.

Notamment, la mise en défaut de l'isolation des conducteurs par échauffement est l'une des principales causes de réduction de vie des machines [90]. Les phénomènes mis en jeu lors de l'augmentation des températures, et qui mènent à un défaut d'isolation, sont décrits par exemple dans [91].

La contrainte thermique est donc forte et doit être prise en considération. La modélisation des phénomènes en jeu dans les machines est une tâche importante. Soit elle permettra de valider l'utilisation de la machine, en montrant que les limites ne sont pas atteintes. Soit la contrainte thermique devra influencer la géométrie et/ou le fonctionnement de la machine afin de limiter les échauffements dans les zones critiques.

Jusqu'à présent, V. Reinbold considérait cette contrainte de manière simplifiée, en limitant la densité de courant dans les enroulements du stator à 12 $A{\cdot}mm^{-2}$. Notre objectif lors de cette étude, est de parvenir à établir un modèle analytique thermique robuste de la machine, permettant d'obtenir rapidement les températures des zones critiques de celle-ci (enroulements, aimants, huile) en régime permanent. Tout point de fonctionnement menant à un échauffement trop important en régime permanent d'au moins une de ces zones ne sera pas autorisé.

Le calcul des températures en régime permanent est une hypothèse conservatrice, qui nous permet de garantir un fonctionnement fiable d'un point de vue thermique à chaque instant du cycle d'utilisation. En effet, les phénomènes thermiques sont lents à l'échelle des accélérations du véhicule, et donc des sollicitations de la machine. C'est pourquoi en fonctionnement réel, la machine ne devrait pas atteindre la température issue d'un calcul en régime permanent à un instant donné.

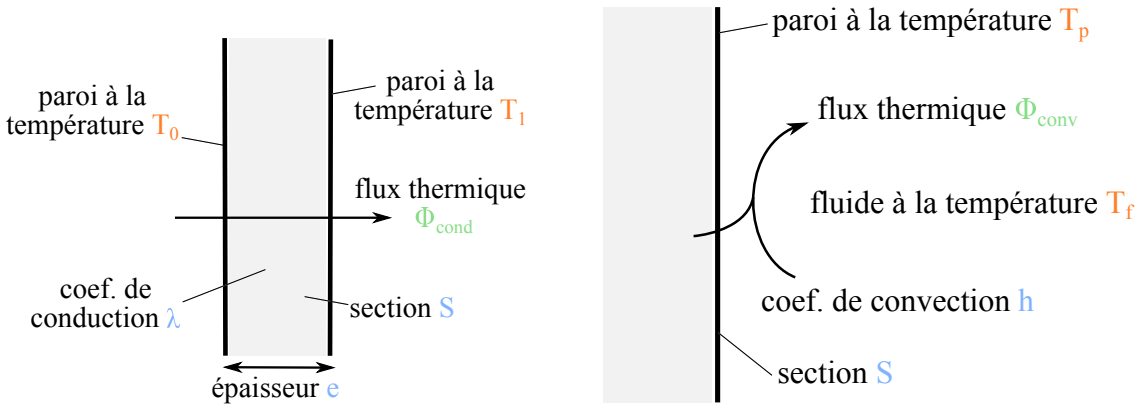
4.1.1.2. Les modes de transfert thermique

En fonctionnement, la chaleur est dégagée par les pertes dans la machine. Les pertes par effet Joule dans les enroulements et les pertes fer au stator sont majoritaires. Nous négligerons par la suite les pertes fer au rotor (hypothèse du 1^{er} harmonique) et les pertes dans les aimants. Il existe trois modes fondamentaux de transfert de la chaleur :

— la conduction : la chaleur est diffusée à travers un support solide sous l'effet d'un gradient de température (ex : une casserole métallique est chauffée par conduction au contact d'une plaque chaude). La conductivité thermique d'un matériau est donné par son coefficient λ (exprimé en $W \cdot m^{-1} \cdot ℃^{-1}$). Le phénomène est illustré sur la figure 4.1(a) dont les paramètres sont liés par l'équation 4.1 ;

— la convection : les différences de température au sein d'un fluide engendrent des mouvements dû à une différence de masse volumique. La chaleur circule alors à l'échelle macroscopique (ex : l'eau dans la casserole est en mouvement car elle est chauffée par le bas et refroidie en surface). La convection peut être naturelle (mouvement causé par la source de chaleur uniquement) ou forcée (circulation artificielle). Tout échange convectif est représenté par un coefficient h (exprimé en $W \cdot m^{-2} \cdot ℃^{-1}$). Le phénomène est illustré sur la figure 4.1(b) dont les paramètres sont liés par l'équation 4.2 ;

— le rayonnement : quelle que soit sa température, tout corps émet un rayonnement électromagnétique. Cette énergie peut être transmise sans support (c'est-à-dire dans le vide) et est convertie en chaleur lorsqu'elle est absorbée par un corps (ex : la plaque électrique émet un rayonnement que je ressens à distance).



(a) Phénomène de conduction. Un flux thermique (en W) apparaît entre les parois 0 et 1, séparées par un matériau solide, par différence de température (*cf.* équation 4.1).

(b) Phénomène de convection. Un flux thermique (en W) apparaît par refroidissement d'une paroi solide par un fluide (*cf.* équation 4.2).

Figure 4.1. Phénomènes de conduction et de convection.

$$\phi_{cond} = \frac{\lambda}{e} \cdot S \cdot (T_0 - T_1) \tag{4.1}$$

$$\phi_{conv} = h \cdot S \cdot (T_p - T_f) \tag{4.2}$$

On choisit de négliger le phénomène de rayonnement pour notre étude, ce qui est courant pour les machines possédant un refroidissement par convection forcée, et/ou des gradients de températures internes faibles [92].

Ainsi, les pertes générées dans la machine sont évacuées vers l'extérieur via ces différents modes de transfert. Nous verrons dans la partie 4.3 que ce refroidissement n'est pas naturel, mais forcé par un fluide externe circulant dans le carter.

4.1.2. État de l'art et choix d'une approche

Il existe deux approches principales de modélisation des phénomènes thermiques dans une machine électrique [93], dont les avantages et les inconvénients sont résumés dans le tableau 4.1 :

— les réseaux de résistances thermiques (*Lumped parameter thermal networks* (LPTN) en anglais). À l'image du modèle par réseau de réluctances, les échanges thermiques sont représentés par un schéma électrique équivalent. Celui-ci permet un calcul très rapide des températures. Néanmoins, sa construction nécessite une bonne connaissance des chemins du flux thermique dans la machine afin d'obtenir des résultats précis. On pourra se référer par exemple à [94 – 96].

— les approches numériques : ces méthodes permettent le calcul de phénomènes locaux comme les gradients de température. Cela nécessite cependant un temps de résolution important. Deux types de méthodes sont notamment à distinguer :

→ les méthodes de type éléments finis (*Finite element analysis* (FEA)) sont particulièrement adaptées au calcul dans les régions solides (phénomène de conduction). La définition des conditions aux limites est une difficulté, notamment pour des échanges convectifs. FLUX [97] est un logiciel utilisant une telle approche. Une analyse par éléments finis est utilisées par exemple dans [35, 94, 98] ;

→ les méthodes spécifiques à la dynamique des fluides (*Computational fluid dynamics* (CFD)) sont principalement utilisées pour le calcul de température dans les fluides, par exemple dans les espaces autour des têtes de bobine. Elles souffrent toutefois d'un coût calculatoire très important. Des exemples d'utilisation sont donnés dans [99, 100]. Un couplage des méthodes FEA et CFD est présenté dans [101].

Tableau 4.1. Comparaison des méthodes d'analyse thermique (application type machine électrique).

	LPTN	FEA	CFD
plus adapté à	tout mode	la conduction	la convection
précision	faible	élevée	élevée
temps de calcul	< seconde	minutes	heures
complexité du modèle	faible	élevée	élevée

Il est évident que les méthodes FEA et CFD ne sont pas adaptées à une utilisation dans un processus d'optimisation, qui est lui même déjà long à résoudre. Cependant, ces modèles fins sont appropriés dans le cadre de validation en pré ou post-traitement. L'approche que nous retenons est l'utilisation d'un modèle par éléments finis pour comprendre les chemins du flux thermique dans la machine (*cf.* partie 4.3), qui servira de référence pour construire un modèle LPTN (*cf.* partie 4.4). La démarche complète pour la prise en compte des phénomènes thermiques est résumée sur la figure 4.2.

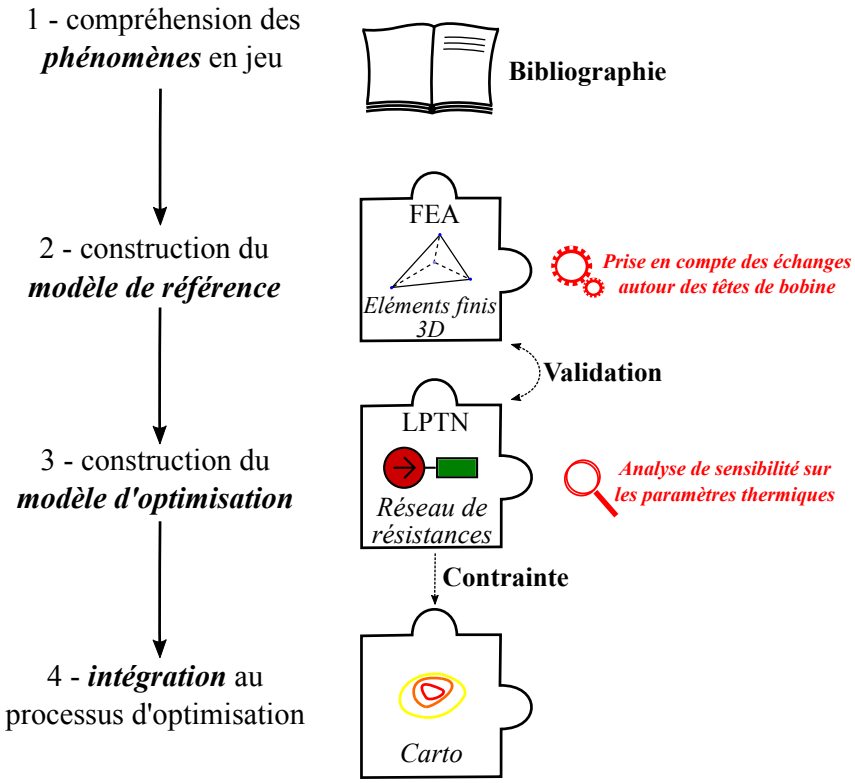


Figure 4.2. Démarche de prise en compte des phénomènes thermiques dans la machine.

Comme nous l'avons déjà introduit en début de chapitre, nous choisissons de construire des modèles en régime permanent. Nous considérons que si les températures maximales des zones critiques ne sont pas dépassées en régime permanent, alors elles ne le seront pas non plus en régime transitoire à quantité de pertes identiques.

Notons que les pertes par effet Joule sont elles-mêmes dépendantes de la température, puisque la résistivité électrique du cuivre dépend de celle-ci. Donc, implicitement, un problème lie les pertes et la température. Nous ne considérerons pas ici cette variation de la résistivité : les pertes seront toujours calculées à partir d'une température fixée (à 147 °C, ce qui est un cas défavorable) et les températures dans la machine seront déduites de ces pertes.

Le tableau 4.2 présente les températures admissibles maximales pour les trois zones critiques de la machine : les bobinages, l'huile interne de refroidissement et les aimants

permanents. Les valeurs ont été collectées dans [35]. Pour les aimants, nous choisissons la nuance VACODYM 688 TP [102].

Tableau 4.2. Contraintes thermiques dans la machine électrique.

Région critique	Température maximale [°C]
bobinage	170
huile interne	158
aimants permanents	220

4.2. Régions complexes pour l'analyse thermique des machines

L'analyse des échanges thermiques dans les machines électriques est complexe, notamment car les phénomènes en jeu dépendent fortement :

— des procédés de fabrication de la machine (ex : contact entre les matériaux) ;

— de la multiplicité des matériaux utilisés ;

— de la géométrie de la machine (échanges en 3 dimensions).

La complexité des phénomènes thermiques est particulièrement présente dans certaines régions de la machine [92, 103, 104]. Nous les détaillons ci-dessous.

4.2.1. Les interfaces entre composants solides

Lors de l'assemblage de la machine, des interstices (*ex* : air, graisse thermique, résine) peuvent exister entre deux éléments. L'air étant un mauvais conducteur de chaleur, une forte résistance thermique dite de contact apparaît. Ce défaut est causé par différents facteurs : les procédés de fabrication (ex : pression de serrage), les caractéristiques des matériaux (ex : dureté, rugosité, etc.), la nature du fluide emprisonné, etc. Des données expérimentales existent [105, 106]. Voici quelques exemples d'interfaces, que l'on retrouve sur la figure 4.3 :

— tôles stator / carter ;

— isolation du bobinage / tôles stator ;

— aimants permanents / tôles rotor.

Dans le cas où l'on peut faire des tests sur la machine réelle, la méthode afin de mesurer cette résistance consiste à faire circuler une quantité connue de flux de chaleur à travers l'interface et à relever les températures de part et d'autre de celle-ci.

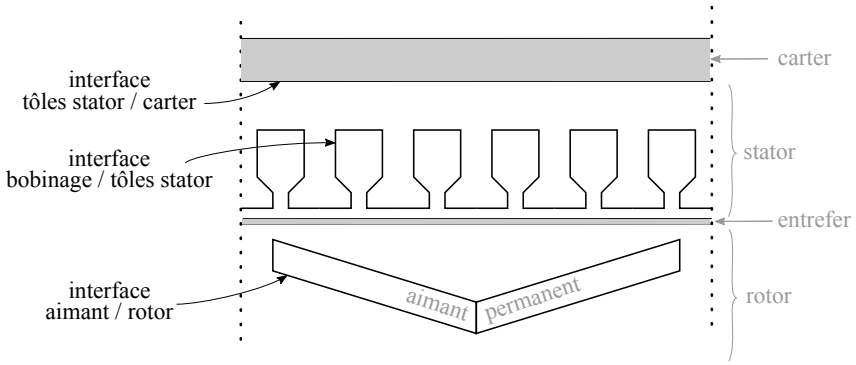


Figure 4.3. Interfaces entre composants solides dans une machine synchrone à aimants permanents. La figure est un schéma simplifié en coupe axiale de 1/2 pôle d'une machine.

4.2.2. L'écoulement autour des têtes de bobine

C'est une zone particulièrement importante car c'est l'une des plus chaudes de la machine, mais elle est également très complexe. Le mode de transfert de la chaleur est principalement la convection (naturelle, forcée). Le coefficient d'échange est fortement dépendant de la géométrie (des têtes, de la cavité) et du fluide (vitesse, nature).

Dans la machine que nous étudions, une pièce montée sur le rotor (*slinger*) projette l'huile baignant la machine sur les têtes de bobines. Dans [35], qui analyse les échanges thermiques dans la machine de référence, le coefficient de convection h est déterminé pour faire correspondre un modèle aux mesures expérimentales, et vaut alors 25 $W \cdot m^{-2} \cdot °C^{-1}$. La littérature fait état d'une variabilité de ce coefficient avec la vitesse périphérique du rotor (*cf.* figure 4.4), et sur différentes zones des têtes de bobines [95, 107 – 109].

4.2.3. Les bobinages

Dans les enroulements statoriques, les conducteurs ne sont pas toujours agencés régulièrement, notamment au niveau des têtes de bobines. De plus, les constituants présents dans chaque encoche sont nombreux : les conducteurs en cuivre sont entourés d'un vernis d'émaillage permettant l'isolation entre les spires, et ils sont plongés dans un vernis d'imprégnation (avec une bonne tenue mécanique et une bonne conductivité thermique) ou une résine [91].

Les enroulements étant le siège principal de source de chaleur, nous devrons porter une attention particulière à la modélisation de la conduction thermique dans cette zone. Nous relevons plusieurs stratégies pour cela.

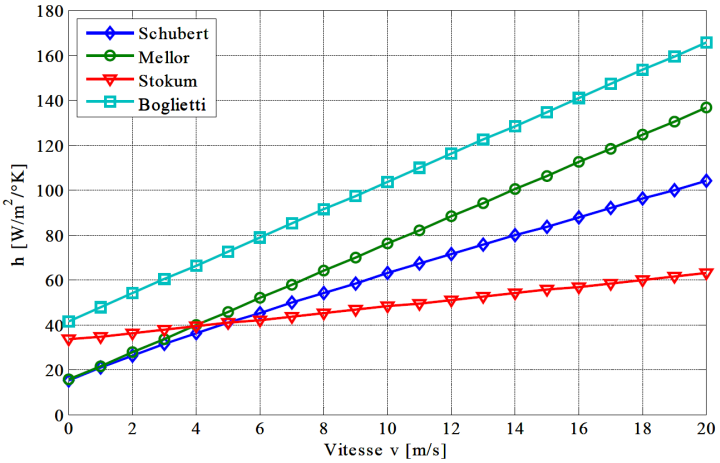


FIGURE 4.4. Évolution du coefficient de convection h autour des têtes de bobine en fonction de la vitesse périphérique du rotor [92]. Ce graphique a été construit à partir des données de [95, 107 – 109], où le fluide entourant les têtes est simplement de l'air dans la plupart des cas.

— Assimilation des enroulements à un matériau homogène, de conductivité thermique équivalente. On considère qu'il n'est pas nécessaire de représenter l'ensemble des conducteurs afin d'obtenir la température à la surface du bobinage [90, 98, 104, 110]. Le taux de remplissage de l'encoche intervient comme paramètre de la conductivité équivalente [94, 111]. Cette méthode est appropriée dans le cadre d'un modèle analytique par réseau de résistances.

— Utilisation de courbes expérimentales. La conductivité thermique équivalente est déduite de la conductivité de l'isolant, de la répartition des conducteurs et de leur forme [112].

— Modèle bi-couche. Les enroulements sont représentés par un conducteur massif entouré par une couche d'isolant [99]. La section du conducteur massif correspond à la somme des sections des conducteurs réels.

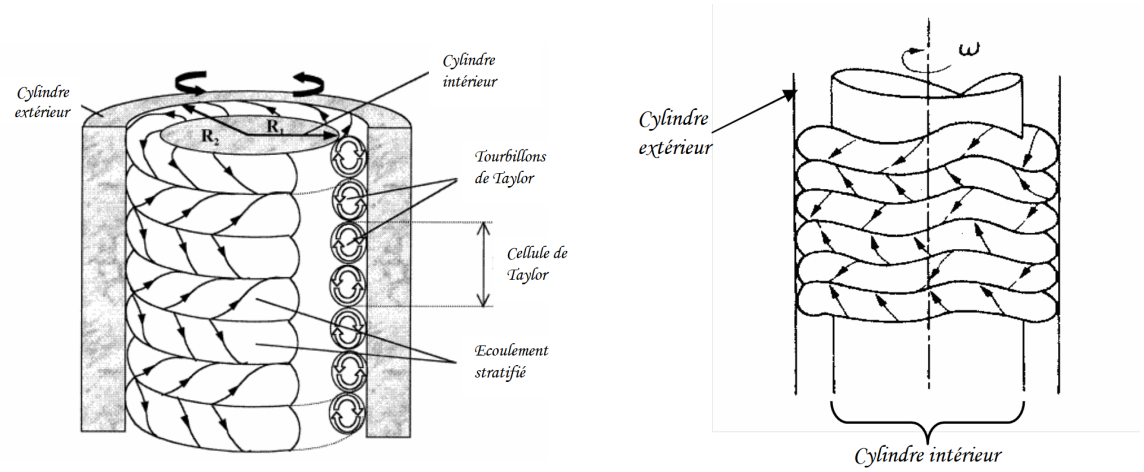
— Modèle multi-couche. Les conducteurs isothermes sont reliés, et chaque couche est séparée par une couche d'imprégnation [103]. Cette méthode part du principe qu'à égale distance des tôles de fer du stator, les conducteurs ont la même température.

4.2.4. L'entrefer

Dans cette zone, le fluide s'écoule entre deux cylindres coaxiaux, avec rotation du cylindre interne, ce qui correspond à un écoulement de Taylor-Couette [92, 113]. À faible vitesse, l'écoulement est dit laminaire (*cf.* figure 4.5(a)). La conduction est alors le mode de transfert thermique principal. Lorsque la vitesse augmente et que le nombre de Taylor (Ta) dépasse un certain seuil, le régime d'écoulement devient turbulent (*cf.* figure 4.5(b)). Dans

cet écoulement complexe, la conduction ne peut plus être considérée seule. La saillance du rotor et/ou du stator complexifie également les échanges.

Dans notre étude, nous faisons l'hypothèse que l'entrefer peut être assimilé à un matériau solide où la conduction sera l'unique mode d'échange de chaleur. C'est le choix qui a été fait dans [35].



(a) Écoulement laminaire de Taylor-Couette.

(b) Seconde instabilité d'un écoulement dans un espace annulaire. Il se produit lorsque la vitesse du rotor augmente.

FIGURE 4.5. Régimes d'écoulement dans l'entrefer [114].

Étant donnée la complexité des échanges thermiques dans diverses régions de la machine électrique, l'estimation de la températures dans les zones critiques de celle-ci (bobinages et aimants notamment) semble être problématique.
Des mesures sur la machine réelle sont souvent la meilleure solution afin d'évaluer les coefficients d'échange dans ces régions. Toutefois, en phase de dimensionnement, la machine réelle n'existe pas, et nous sommes amenés à faire varier sa géométrie ce qui influence ces coefficients plus ou moins fortement.

4.3. Construction d'un modèle de référence par éléments finis

Cette partie décrit la construction d'un modèle thermique par éléments finis en 3 dimensions de la machine électrique. Dans un premier temps, nous recenserons les données sur la machine. Ensuite, nous présenterons les méthodes et les données utilisées

pour construire le modèle. Notamment, nous décrirons notre approche pour prendre en compte les échanges convectifs autour des têtes de bobine. Finalement, nous analyserons les chemins principaux de flux de chaleur, qui nous permettront de construire le modèle LPTN dans la partie 4.4.

4.3.1. Description de la machine

Nous rappelons ici que la machine électrique étudiée est une machine synchrone à aimants enterrés. La machine de référence (*cf.* chapitre 2) a été analysée dans [35] d'un point de vue thermique. Elle est de type TEFC (*Totally Enclosed Fan-Cooled*), c'est-à-dire qu'elle est enveloppée dans un carter qui ne permet pas à l'air ambiant de refroidir directement les parties actives de la machine (*cf.* figure 4.6). Le refroidissement est assuré par :

— un échangeur de chaleur externe. Il permet la circulation d'un fluide de refroidissement (composé d'un mélange eau/éthylène/glycol) à travers le carter via des canaux de refroidissement, et dont la température et le débit sont ajustables ;

— un mélange air/huile interne contenu dans le carter (il sert également à la lubrification des pièces). Celui-ci est notamment projeté sur les têtes de bobines grâce à une pièce spécifique rainurée (*slinger*) qui est liée au rotor ;

— l'air ambiant entourant le carter refroidit celui-ci par convection naturelle.

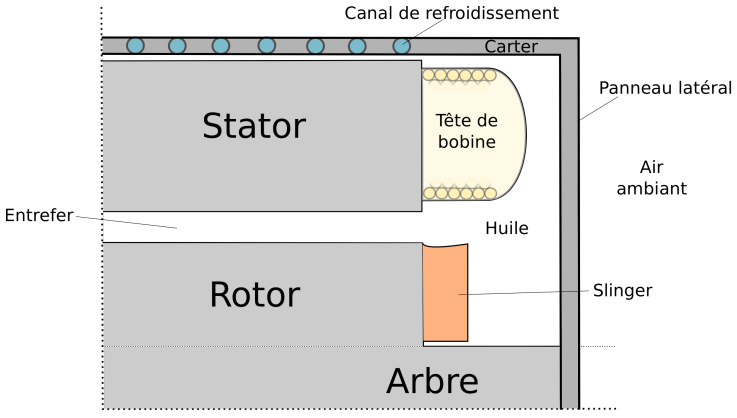


Figure 4.6. Description de la machine d'un point de vue thermique (plan axial). Le schéma représente 1/4 de la machine (dont la moitié de sa profondeur) et n'est pas à l'échelle.

Les symétries dans la machines nous permettront de réduire la modélisation à $1/16^{ème}$ de la machine (1 pôle avec une demi profondeur) dans le cas du modèle FEA. Cela nous permettra d'obtenir avec précision les températures et flux thermiques dans la machine pour un coût calculatoire limité (moins de 5 minutes avec un maillage fin,

hors construction du maillage). Lors de la construction du LPTN, nous réduirons le modèle de moitié (1/2 pôle), ce qui correspond à la configuration minimale autorisée par les symétries géométriques dans la machine

4.3.2. Construction du modèle

La version 12.3 du logiciel Flux [97] est utilisée pour la construction du modèle. Nous choisissons l'application *Thermique Permanent 3D*. L'ensemble des valeurs choisies pour les paramètres qui seront décrits ci-dessous sont synthétisées dans le tableau 4.3, à la fin de cette sous-partie. La mise en œuvre d'un tel modèle par éléments finis pose un certain nombre de questions.

— Quelles conditions aux limites doit-on adopter ?

— Comment modéliser les milieux conductifs complexes décrits plus haut ?

— Comment modéliser les échanges convectifs, notamment autour des têtes de bobine ?

4.3.2.1. Conditions aux limites

La surface externe du carter est choisie comme limite du domaine. Deux conditions aux limites sont appliquées.

— Un échange convectif avec l'air ambiant est défini sur le panneau latéral (*cf.* figure 4.6). Il est caractérisé par la température T_∞ et le coefficient h_{cas}.

— Une température T_{cas} est imposée sur le cylindre externe afin de représenter l'échange avec le système de refroidissement. Elle est choisie ici grâce aux mesures réalisées dans [35] qui donne la température du carter pour un point de fonctionnement et une température du fluide de refroidissement donnés.

4.3.2.2. Milieux conductifs complexes

Comme cela a été décrit dans la partie 4.2, nous considérerons l'entrefer comme un solide où la conduction est l'unique mode d'échange de chaleur, caractérisé par le coefficient de conduction λ_{gap}.

Dans les bobinages, la conduction est anisotrope puisque importante dans le sens des conducteurs et plus faible dans un plan qui leur est normal. Nous utilisons ici un modèle que l'on peut qualifier de bi-couche :

— l'encoche est représentée par un conducteur massif anisotrope (soit deux coefficients de conduction, un par direction : λ_{slax} et λ_{slrad}) ;

— l'isolant d'encoche (de conduction λ_{slins} et d'épaisseur e_{slins}) est représenté par une couche mince (*i.e.* une surface de très faible épaisseur) ajoutée autour du conducteur.

λ_{slrad} a été calculé à partir des abaques présentées dans [112] et des hypothèses suivantes : les bobinages sont considérés ronds et alignés, avec un taux de remplissage de 50% et l'isolant d'imprégnation est caractérisé par $\lambda_{impr} = 1{,}559\ W \cdot m^{-1} \cdot °C^{-1}$. Concernant l'isolant d'encoche, le matériau utilisé est de type Mylar (*cf.* [35]), dont les caractéristiques sont issues de [115].

Remarque : Les têtes de bobine sont considérées à part. Nous avons tout d'abord essayé d'utiliser l'outil dédié dans le logiciel Flux afin de construire automatiquement les têtes (modèle bi-couche), mais cela n'a pas abouti car l'outil ne fonctionnait pas correctement. Les têtes de bobine sont donc finalement modélisées par un conducteur massif. Toutefois, le matériau des têtes est défini comme isotrope avec $\lambda_{end} = \lambda_{slrad}$. En effet, Flux3D ne permet pas de représenter facilement un volume avec une anisotropie variable spatialement. De plus, la faible valeur choisie pour λ_{end} est justifiée par la direction principale des conducteurs dans cette zone comme l'illustre la figure 4.7. Dans les têtes nous attendons un flux normal à la direction principale des enroulements.

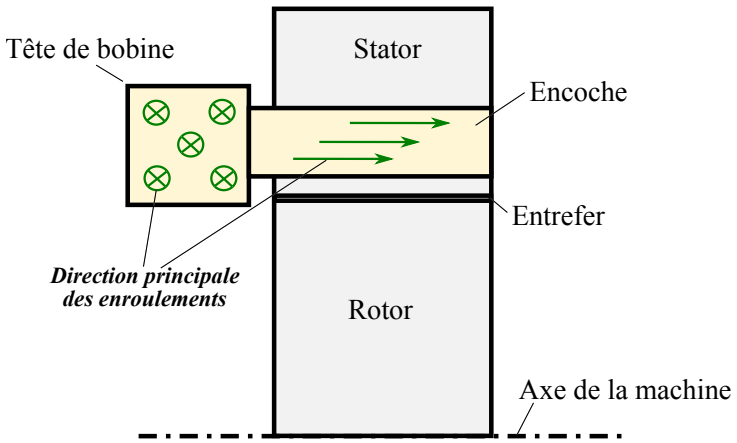


Figure 4.7. Direction principale des enroulements dans la machine. Dans les têtes de bobine, on fait l'hypothèse que le flux thermique sera majoritairement normal à cette direction, c'est pourquoi nous choisissons une faible valeur pour le coefficient de conduction λ_{end} dans cette zone.

4.3.2.3. Échanges convectifs internes

Flux3D ne permet pas la modélisation d'un fluide dans une zone interne de la géométrie. Le phénomène de convection ne peut être appliqué qu'à une surface externe, comme condition limite. Afin de modéliser la cavité interne contenant le mélange air/huile, nous

avons dû mettre au point une représentation équivalente de l'échange thermique qui y existe.

Cette représentation est basée sur une équivalence que nous choisissons de faire entre les relations permettant de calculer le flux thermique (exprimé en W) échangé par convection (équation 4.2) et celui échangé par conduction (équation 4.1). Les notations utilisées dans ces équations ont été explicitées sur les figures 4.1(b) et 4.1(a).

Ainsi, on suppose que l'on peut représenter un échange convectif régi par un coefficient h, par une couche mince équivalente de conductivité λ_{eq} et d'épaisseur e_{eq}. Les coefficients sont liés par l'équation 4.3.

$$\lambda_{eq} = h \cdot e_{eq} \tag{4.3}$$

La cavité contenant le mélange air/huile est quant à elle représentée par un matériau de conductivité λ_{oil} très élevée qui permet de représenter l'homogénéité du fluide. En effet, celui-ci est mélangé en permanence par le mouvement du rotor et l'action du *slinger*.

Afin de valider cette représentation équivalente, des comparaisons ont été réalisées sous Flux (en 2 et 3 dimensions) entre :

— une tête de bobine avec un échange convectif en condition limite d'une part ;

— le modèle équivalent : *tête de bobine - couche mince équivalente - cavité - carter* d'une autre part.

Les distributions de températures et les flux thermiques observés dans les deux cas sont très similaires. Pour une même quantité de pertes par effet Joule, les températures maximales obtenues dans les têtes de bobine sont égales.

Le tableau 4.3 regroupe l'ensemble des données utilisées pour la simulation sous Flux3D. Les résultats que nous avons obtenus sont décrits ci-dessous.

4.3.3. Analyse des résultats

Le modèle entier de la machine est présenté sur la figure 4.8(a). Les têtes de bobines ainsi que les conducteurs d'encoche y sont représentés en jaune, tandis que les parties métalliques sont en turquoise.

Ce sont les pertes dans la machine qui sont à l'origine des échauffements. Nous présentons ici un exemple de résultats obtenus pour un fonctionnement précis de la machine : 180 $N \cdot m$ @ 960 $tr \cdot min^{-1}$. Ce point de fonctionnement a été étudié à peu de choses près sur la machine de référence réelle dans [35], ce qui nous permet de connaître les températures auquel il aboutit. Pour notre simulation, nous déterminons les valeurs des pertes (*cf.* tableau 4.3) grâce au modèle RNM développé par V. Reinbold (*cf.* chapitre 3), valeurs qui ont été confirmées par des simulations électromagnétiques sous Flux2D. Les

Tableau 4.3. Récapitulatif des données utilisées pour la construction du modèle thermique de référence.

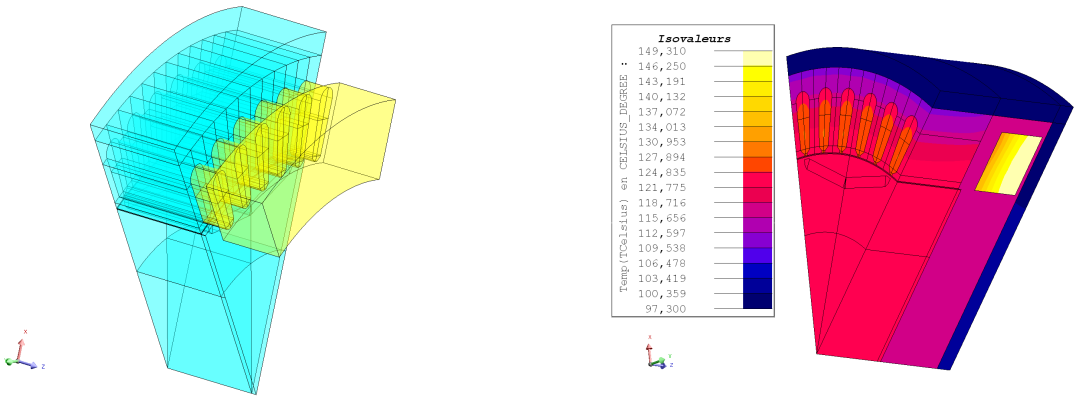
	Caractéristiques	**Références**
Volumes	$\lambda : [W \cdot m^{-1} \cdot ℃^{-1}]$	
aimants permanents	$\lambda_{PM} = 47.3$	[35]
carter	aluminium / $\lambda_{cas} = 52$	
encoche (axial)	cuivre / $\lambda_{slax} = 394$	
encoche (radial)	cuivre & isolant / $\lambda_{slrad} = 4.7$	[111]
tête de bobine	cuivre & isolant / $\lambda_{end} = 4.7$	
entrefer	air-huile / $\lambda_{gap} = 10$ écoulement de Taylor-Couette	[35]
stator & rotor (axial)	fer / $\lambda_{ax} = 5.21$	[35]
stator & rotor (radial)	fer / $\lambda_{rad} = 51.9$	[35]
cavité	air-huile / $\lambda_{oil} = 1000$	
Surfaces	$h : [W \cdot m^{-2} \cdot ℃^{-1}]$ & $e : [m]$	
contact stator/carter	$\lambda_{ctc} = 0.075$ / $e_{ctc} = 6.10^{-5}$	[35, 104]
couche mince équivalente (convection huile)	$\lambda_{eq} = 0.0125$ / $e_{eq} = 5.10^{-4}$ $\Longleftrightarrow h_{oil} = 25$	[35]
isolant encoche	matériau de type Mylar $\lambda_{slins} = 0.125$ / $e_{slins} = 19.10^{-5}$	[35, 115]
refroidissement forcé du carter	$T_{cas} = 97.3℃$	[35]
refroidissement naturel du carter	$T_{\infty} = 50℃$ / $h_{cas} = 5$	
Pertes	$P : [W]$	
joule	$P_j = 935$	
fer (stator)	$P_{fer} = 84$	

pertes sont réparties de manière homogène dans le fer (dents et culasse au stator) pour les pertes fer, et dans les conducteurs (encoches et tête) pour les pertes par effet Joule.

Remarque : La répartition homogène des pertes fer est une simplification. En réalité, ce n'est pas le cas, car l'induction n'est pas identique en tout point des dents et de la culasse.

D'après les mesures issues [35], si le fluide de refroidissement est injecté à 50 ℃, alors la température du carter est en moyenne de 97,3 ℃ pour ce point de fonctionnement. C'est donc la condition limite que nous considérons sur le cylindre du carter. Les températures finalement obtenues dans la machine via notre propre modèle par éléments finis sont représentées sur la figure 4.8(b).

On observe que la valeur maximale (149 ℃) est atteinte dans les têtes de bobine. Le mélange air/huile interne atteint environ 118 ℃, valeur également relevée dans [35].



(a) Géométrie de la machine sous Flux3D ($1/16^{ème}$ représenté). Le carter a été rendu invisible pour plus de clarté.

(b) Températures en régime permanent obtenues dans la machine électrique pour les pertes données par le tableau 4.3. Les températures sont exprimées en °C.

FIGURE 4.8. Modélisation et résultats sous Flux3D.

Au rotor, les aimants atteignent 124 °C environ, bien en deçà de la limite choisie dans le tableau 4.2.

Cependant, le résultat principal qui nous intéresse ici sont les chemins privilégiés par le flux thermique pour l'évacuation des pertes. Nous remarquons plusieurs tendances :

— le chemin principal est : *tête de bobine* → *encoches* → *culasse statorique* → *carter*. Environ 92% de la chaleur générée dans la machine (soit 939 W) traverse l'interface stator/carter ;

— l'échange entre les têtes de bobine et le mélange air/huile est faible (128 W) ;

— le rotor a un très faible impact sur le comportement thermique ici puisque seulement 6,4 W transitent à travers l'entrefer ;

— les gradients de température sont élevés entre les têtes et l'huile (31 °C) et entre les têtes et les encoches au centre de la machine (28 °C).

4.4. Construction d'un modèle par réseau de résistances pour l'optimisation

À présent, nous souhaitons construire un modèle de type LPTN. Celui-ci sera validé par le modèle par éléments finis (FEA) développé dans la partie précédente. Le LPTN devra être paramétré par les dimensions géométriques de la machine afin d'être utilisé lors du processus d'optimisation complet du véhicule.

4.4.1. Description théorique

4.4.1.1. Principe

Les réseaux de résistances thermiques (*Lumped parameter thermal networks* (LPTN) en anglais) sont des modèles très intéressants, car ils sont à la fois précis et rapide à résoudre. On peut trouver des exemples de leur utilisation dans [90, 93 – 96, 116]. À l'image du modèle RNM pour les phénomènes électromagnétiques, le modèle LPTN repose sur une analogie entre les phénomènes thermiques et électriques. Cette analogie est résumée dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4. Équivalence entre certaines grandeurs thermiques et électriques.

Grandeur thermique	Grandeur électrique
température en °C température imposée	tension en V source de tension
puissance thermique en W source de chaleur	courant en A source de courant
résistance thermique en $K \cdot W^{-1}$	résistance électrique en Ohm

L'idée générale des réseaux de résistances est de diviser la machine en zones où la température est globalement homogène. Ces zones sont alors représentées par les nœuds du réseau thermique. Ensuite, il s'agit d'associer à chaque nœud une source de tension si la température y est imposée, ou de courant si de la chaleur est générée dans la zone. Si le nœud représente une zone ou le flux thermique ne fait que circuler, alors il n'y a pas besoin d'ajouter de source. Enfin, il faut relier les nœuds entre eux de manière à représenter la circulation du flux de chaleur entre les différentes zones de la machine. Les nœuds sont alors séparés par une résistance thermique dépendant du mode de transfert sollicité (conduction, convection) ainsi que des caractéristiques de la surface ou du volume d'échange (dimensions, paramètres thermiques). La figure 4.9 décrit un réseau thermique simple avec sources et résistance.

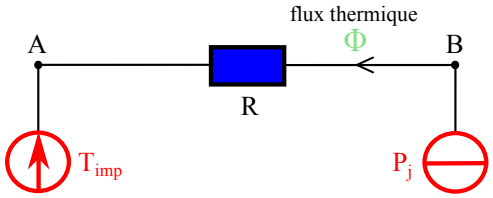


Figure 4.9. Exemple de réseau thermique simple. Un flux thermique s'établit à travers la résistance R sous l'effet de la source P_j (pertes) et de la température imposée T_{imp}. La température du nœud B pourra être déduite grâce aux équations 4.1 et 4.4 par exemple.

4.4.1.2. Modélisation du composant de base : la résistance thermique

Nous décrivons ci-dessous trois catégories de résistances basiques que nous utiliserons dans notre réseau. Nous reprenons des notations similaires à celles de la partie 4.3, c'est-à-dire que e représente une épaisseur en $[m]$, λ est un coefficient de conduction en $[W \cdot m^{-1} \cdot ℃^{-1}]$ et h un coefficient de convection en $[W \cdot m^{-2} \cdot ℃^{-1}]$.

— Une résistance de conduction à travers un parallélépipède de section S $[m^2]$ est définie grâce à l'équation 4.4. La figure 4.10 décrit les variables de cette équation.

$$R_{cd,plp} = \frac{e}{\lambda \cdot S} \tag{4.4}$$

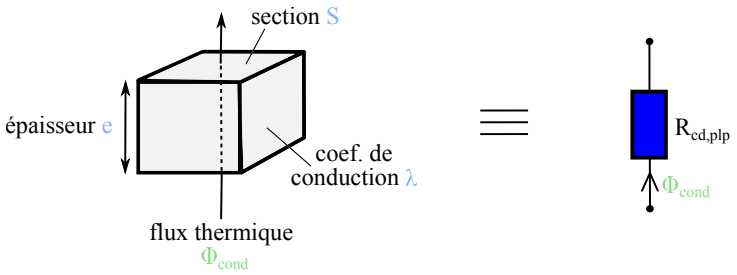


Figure 4.10. Représentation de la conduction à travers un parallélépipède par une résistance thermique équivalente. Les variables sont liées par l'équation 4.4.

— Une résistance de conduction à travers une portion de cylindre (flux radial), avec un rayon externe R_{ext} en $[m]$, un rayon interne R_{int} et une ouverture angulaire α $[rad]$ est définie grâce à l'équation 4.5. La figure 4.11 décrit les variables de cette équation.

$$R_{cd,cyl} = \frac{\ln(\frac{R_{ext}}{R_{int}})}{\alpha \cdot e \cdot \lambda} \tag{4.5}$$

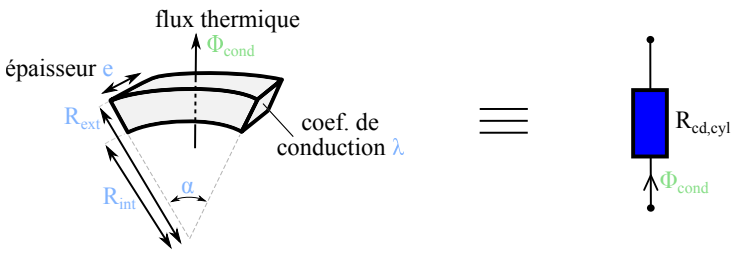


Figure 4.11. Représentation de la conduction à travers une portion de cylindre par une résistance thermique équivalente. Les variables sont liées par l'équation 4.5.

— Une résistance de convection sur une surface S $[m^2]$ est définie grâce à l'équation 4.6. La figure 4.12 décrit les variables de cette équation.

$$R_{cv} = \frac{1}{h \cdot S} \tag{4.6}$$

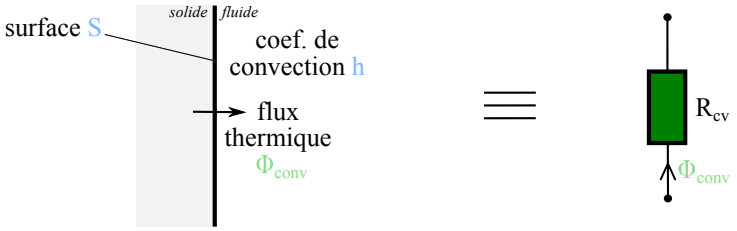


Figure 4.12. Représentation de la convection sur une surface par une résistance thermique équivalente. Les variables sont liées par l'équation 4.6.

4.4.2. Construction du réseau complet

4.4.2.1. Découpage de la machine en zones

Les différentes zones de la machine ainsi que les flux observés lors de l'analyse du modèle par éléments finis sont représentés sur la figure 4.13. Il s'agit donc à présent de construire un réseau nous permettant de représenter le plus fidèlement possible ces échanges.

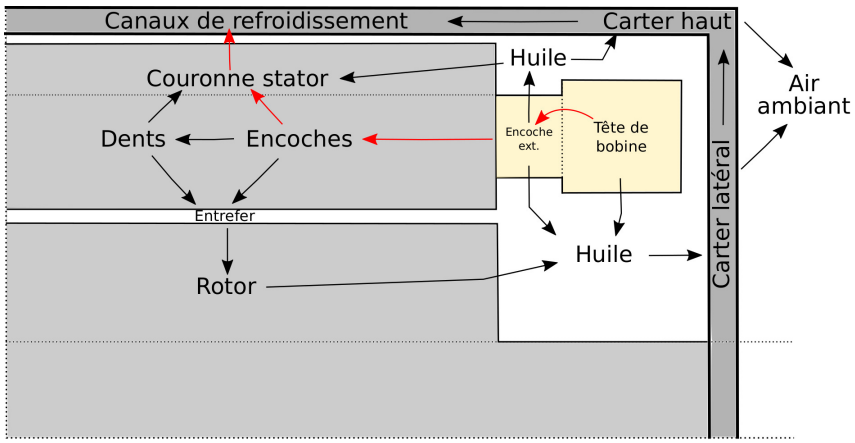


Figure 4.13. Zones et flux thermiques dans la machine (plan axial). Le schéma représente 1/4 de la machine (dont la moitié de sa profondeur) et n'est pas à l'échelle. Le flux principal est dessiné en rouge.

4.4.2.2. Réduction du modèle par symétrie

Les symétries dans la machine permettent de réduire le modèle à $1/32^{ème}$ de la géométrie complète. Ainsi, nous nous focalisons sur l'étude d'un demi-pôle et sur la moitié de la profondeur de la machine. Afin de simplifier le problème, il est plus facile de travailler avec des cellules de type cylindrique et de supposer le flux radial et axial. Ainsi, l'aimant, la dent et l'encoche de cette portion de la machine sont ramenés à une cellule cylindrique comme le présente la figure 4.14.

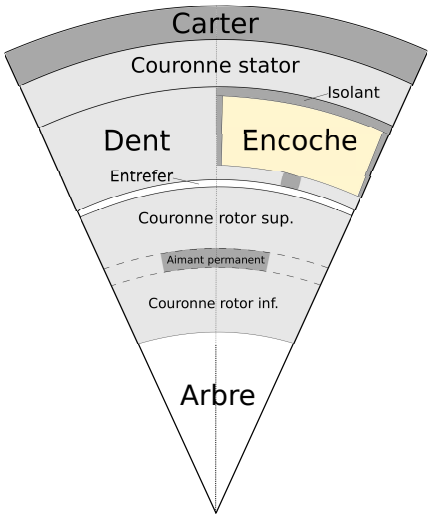


Figure 4.14. Simplification en cellules cylindriques de la machine (coupe axiale). Le schéma représente $1/16^{ème}$ de la machine (1/2 pôle) et n'est pas à l'échelle. Notons que les 3 dents et les 3 encoches sont regroupées en 2 zones distinctes mais que les surfaces réelles d'échanges seront considérées lors du calcul des résistances thermiques.

4.4.2.3. Hypothèse sur les pertes

Nous choisissons de répartir de manière homogène les pertes dans les zones de la machine qui en sont la source. Comme cela a déjà été dit dans le cadre de la construction du modèle FEA, c'est une simplification. Toutefois les pertes fer doivent être réparties entre la dent et la couronne du stator, et les pertes par effet Joule doivent l'être également entre l'encoche et la tête de bobine, car toutes ces zones sont distinctes. Les pertes sont alors divisées selon le volume de chacune de ces zones. Par exemple, pour la machine de référence, les pertes fer sont localisées à 84% dans la culasse (et donc à 16% dans la dent), et les pertes par effet Joule à 55% dans la tête de bobine (et donc à 45% dans l'encoche).

4.4.2.4. Modélisation des zones complexes

Nous détaillons à présent la construction de certaines zones complexes du réseau. Afin d'obtenir un modèle LPTN le plus précis possible, nous nous sommes appuyés sur

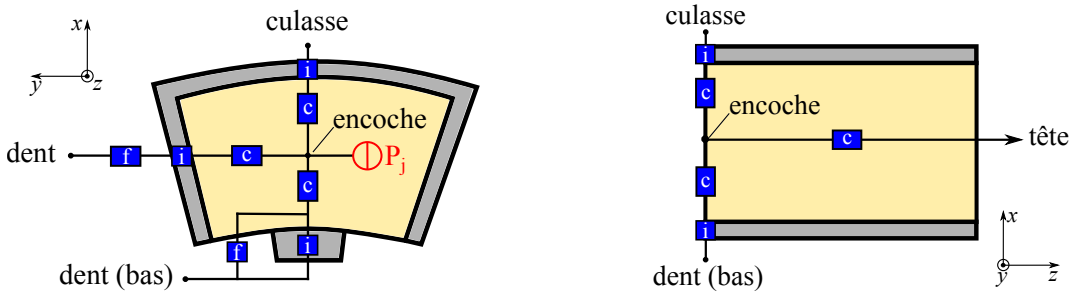
les résultats du modèle par éléments finis.

Modélisation de l'encoche - La modèle utilisé pour l'encoche est représentée sur les figures 4.15(a) et 4.15(b). Nous considérons que le noeud représentant cette zone est au centre de la machine. La chaleur est donc générée à cet endroit. Dans le plan normal à l'axe de la machine (figure 4.15(a)), les chemins d'échange de la chaleur sont multiples :

— vers la culasse, le flux de chaleur doit traverser deux résistances de types cylindriques. La première représente le milieu hétérogène cuivre/imprégnation (noté 'c'), de conductivité λ_{slrad} (*cf.* tableau 4.3). La seconde représente l'isolant d'encoche (noté 'i'), de conductivité λ_{slins} ;

— vers le bas de la dent (c'est-à-dire le haut de l'entrefer). L'échange est similaire à celui décrit ci-dessus (conduction à travers une portion de cylindre), mais avec des dimensions différentes. De plus, on distingue deux chemins au pied de l'encoche : l'un par l'isolant dans la base de l'encoche, l'autre directement à travers le fer statorique, noté 'f'. Pour ce dernier, la conduction (λ_{rad}) est bonne, puisqu'elle a lieu dans le plan des feuillets (lamination) ;

— vers la dent, c'est-à-dire dans la direction orthoradiale. Dans cette direction, on assimile les résistances à des parallélépipèdes dont les dimensions sont déduites des variables géométriques de la machine. L'échange a lieu à travers le mélange cuivre/imprégnation de conductivité λ_{slrad}, puis à travers l'isolant d'encoche (λ_{slins}), et enfin dans le fer de la dent (λ_{rad}).



(a) Coupe axiale au niveau du centre de la machine. **(b)** Dans le plan axial. Dans l'axe de la machine la conduction est bonne (axe des enroulements).

FIGURE 4.15. Modélisation de l'encoche par un réseau de résistances. Les échanges par conduction sont représentés en bleu et les pertes par effet Joule générées dans l'encoche en rouge. L'annotation 'c' indique que l'échange a lieu dans le cuivre, 'i' est utilisé pour un échange à travers l'isolant électrique, et 'f' fait référence au fer.

Remarque : Dans le réseau, une unique résistance représente l'échange entre les encoches et les dents. En réalité, si l'on considère un demi-pôle, l'échange s'effectue entre 3 encoches et 3 dents. Pour représenter cela, les surfaces réelles d'échanges sont considérées lors du

calcul de la résistance thermique qui représente cet échange.

Rappelons que les résistances du réseau sont déduites des paramètres thermiques et des dimensions géométriques ($\mathbb{X}_{me}$) de la machine. Dans le plan axial de la machine (figure 4.15(b)), puisque c'est la direction des enroulements de l'encoche, l'échange est simplement représenté par une résistance de conduction à travers un parallélépipède, et avec le coefficient de conduction λ_{slax}.

Modélisation de la tête de bobine - C'est une zone dont la modélisation est particulièrement difficile : elle associe différents types d'échanges (conduction et convection) et la géométrie des têtes de bobine est en elle-même complexe. Nous choisissons de nous baser sur la géométrie utilisée pour le modèle FEA (*cf.* figure 4.8(a)). Ainsi, les encoches dépassent du stator (zone que l'on nomme *encoche ext.*) et sont en contact avec une portion de cylindre représentant la tête de bobine. De la chaleur est générée dans chacune de ces deux zones. Le réseau thermique est représenté dans le plan axial de la machine sur la figure 4.16.

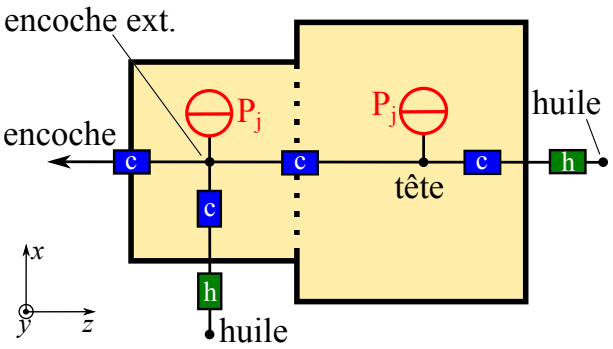


Figure 4.16. Modèle de la tête de bobine dans le plan axial. En plus des échanges par conduction, des échanges convectifs (en vert) ont lieu avec l'huile sur toutes les surfaces externes de la tête et de l'encoche ($h_{oil} = 25\ W \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-1}$).

Depuis la tête de bobine, la chaleur générée par effet Joule peut s'échapper par deux chemins : vers l'huile et vers l'intérieur de la machine.

— Vers l'huile, la chaleur traverse une résistance de conduction (λ_{slrad}) que l'on assimile à un cylindre équivalent. Ensuite, il y a échange convectif (h_{oil}) sur l'ensemble de la surface de la tête de bobine ;

— Vers l'intérieur de la machine :

→ Il y a tout d'abord conduction vers la partie externe des encoches (*encoche ext.*). La résistance en question représente un échange à travers une section correspondant à trois encoches (1/2 pôle), sur la moitié de la longueur de la tête et avec un coefficient de conduction $\lambda_{tete} = 23\ W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$ choisi pour être cohérent avec le modèle FEA (*cf.* remarque ci-dessous) ;

→ Ensuite, la chaleur peut continuer son chemin vers l'intérieur de la machine (*cf.* figure 4.15(b)) ;

→ Elle peut également s'échapper latéralement vers l'huile. Tout d'abord, une résistance de conduction est utilisée. Elle est assimilée à un cylindre de périmètre équivalent à trois encoches (1/2 pôle). Ensuite, une résistance de convection correspond à l'échange avec l'huile sur le cylindre dont la surface est égale à celle des trois encoches.

Remarque concernant le choix de $\lambda_{\mathbf{tete}}$: comme cela a été décrit dans la partie 4.3, nous avons dû considérer une conductivité isotrope $\lambda_{end} = 4{,}7\ W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$ dans la tête de bobine lors de la construction du modèle FEA. Pour le modèle LPTN, la représentation de l'échange *tête/encoche ext.* est différent. Nous considérons un échange sur une longueur plus importante, paramétrée notamment par le rayon de la machine, mais avec une conductivité meilleure que celle utilisé dans le modèle FEA. En effet, la chaleur suit en réalité les conducteurs pour s'échapper vers les encoches. λ_{tete} a ainsi été fixée afin d'obtenir une résistance thermique et un gradient de température équivalents à ceux obtenus sous Flux au niveau de l'échange *tête/encoche ext.*

4.4.2.5. Mise en forme finale

Le modèle LPTN est décrit analytiquement sous Matlab. Il fonctionne comme suit :

— les pertes et les variables géométriques de la machine électrique ($\mathbb{X}_{me}$) sont les entrées du modèle ;

— les paramètres thermiques sont issus de la littérature et des résultats obtenus grâce au modèle FEA ;

— les températures des nœuds du réseau thermique sont les sorties du modèle.

Un calcul analytique permet de déduire la température à chaque nœud du réseau thermique. En fait, cela consiste à résoudre le système d'équations linéaires déduit de la loi de Kirchoff appliquée à chacun des nœuds du réseau.

Le réseau de résistances thermiques complet est finalement présenté sur la figure 4.17. Notons que comme pour le modèle par éléments finis, l'entrefer est assimilé à un solide de conductivité $\lambda_{gap} = 10\ W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$. Le contact entre le stator et le carter est représenté par une résistance de conduction à travers une portion de cylindre avec le coefficient λ_{ctc}. Les paramètres thermiques sont en grande partie repris du tableau 4.3. Il existe cependant une différence pour la représentation de la cavité autour de la tête de bobine : pour le modèle LPTN, l'échange est directement représenté par une résistance de convection. La

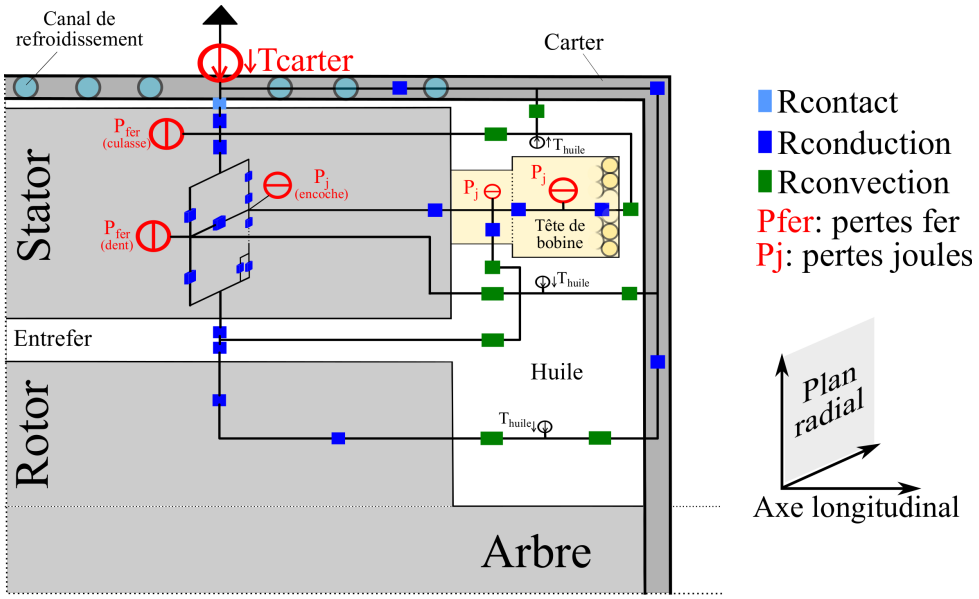


FIGURE 4.17. Réseau de résistances thermiques complet de la machine.

température de l'huile est naturellement homogène puisque tout échange avec la cavité est relié à un même nœud du réseau. Notons que pour l'échange huile/carter, nous utilisons également le coefficient h_{oil}.

4.4.3. Comparaison des modèles LPTN et FEA

Nous présentons ici une première comparaison simple entre le modèle FEA et le modèle LPTN. La géométrie de la machine de référence est utilisée. Nous rappelons que c'est la géométrie à partir de laquelle le modèle a été développé. Les pertes injectées dans la machine sont celles décrites à la fin du tableau 4.3, soit $P_j = 935\ W$ et $P_{fer} = 84\ W$ pour l'ensemble de la machine. La comparaison des températures obtenues dans la machine pour les deux modèles est présentée sur la figure 4.18.

On observe que le modèle LPTN est globalement en très bon accord avec le modèle FEA. Les températures dans les zones critiques (tête de bobine, aimant (rotor) et huile) sont relativement précises, avec des écarts inférieurs à 5% sur les valeurs maximales.

En ce qui concerne les flux thermiques dans la machine, les chemins et les puissances échangées entre les zones sont globalement respectés, comme on peut le voir sur la figure 4.19. La différence la plus importante est observée sur le flux thermique entre les encoches et le reste du stator avec un écart de 15% environ.

4.4.4. Validation du modèle LPTN

Cette sous-partie se focalise sur une validation fonctionnelle du modèle LPTN, c'est-à-dire vis-à-vis d'une utilisation dans le processus d'optimisation. Comme pour les pre-

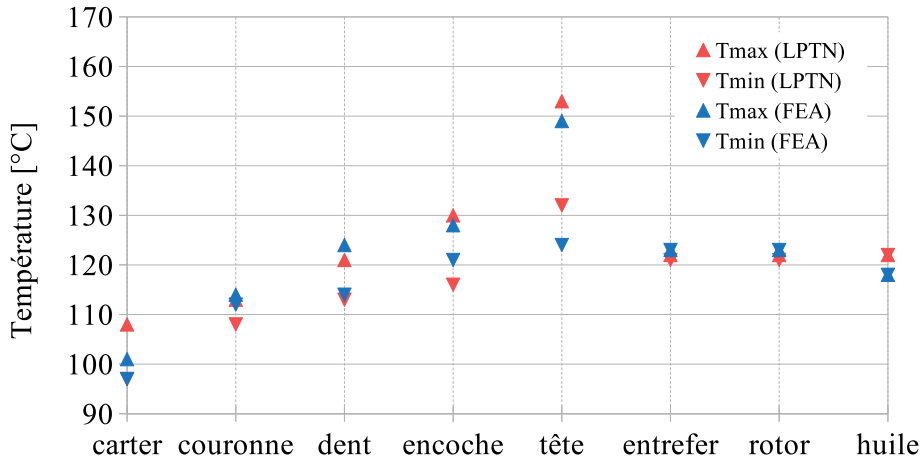


Figure 4.18. Profil de température dans la machine de référence. Comparaison des modèles par éléments finis (FEA, en bleu) et par réseau de résistances (LPTN, en rouge). Les températures maximales et minimales observées dans chaque zone sont affichées.

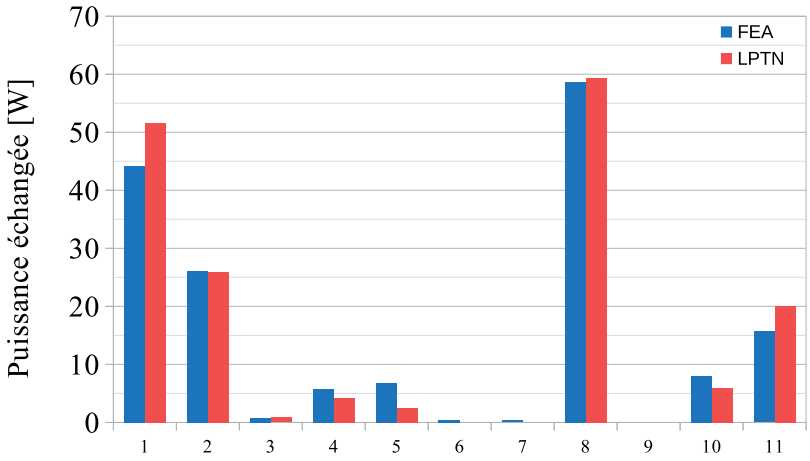


Figure 4.19. Flux de chaleur dans la machine. Comparaison des modèles par éléments finis (FEA, en bleu) et par réseau de résistances (LPTN, en rouge). Voici la correspondance entre les nombres en abscisse et les échanges mesurés :
1 (*encoche* → *stator*), 2 (*encoche ext.* → *encoche*), 3 (*encoche ext.* → *huile*),
4 (*huile* → *carter*), 5 (*huile* → *stator*), 6 (*rotor* → *entrefer*),
7 (*rotor* → *huile*), 8 (*stator* → *carter*), 9 (*stator* → *entrefer*),
10 (*tête* → *huile*) et 11 (*tête* → *encoche ext.*).

miers résultats, l'analyse est faite sur les températures et les flux thermiques dans la machine. Le modèle FEA est toujours utilisé comme référence. Les résultats du modèle LPTN dépendent :

— des dimensions géométriques (variables) de la machine ;

— du point de fonctionnement de celle-ci (pertes) ;

— des paramètres thermiques utilisés.

Nous nous intéresserons à la sensibilité du modèle LPTN vis-à-vis des paramètres thermiques dans la section 4.5. Nous nous concentrons ici sur la robustesse du modèle par

réseau de résistances par rapport à la géométrie et au fonctionnement de la machine. En effet, nous avons jusqu'ici considéré une géométrie fixe (la géométrie de la machine de référence) et un fonctionnement particulier ($P_j = 935\ W$ et $P_{fer} = 84\ W$). Cela nous a permis de comparer nos résultats avec ceux obtenus sur la machine réelle dans [35]. Mais le modèle LPTN reste-t-il en accord avec le modèle FEA lorsque nous faisons évoluer ces entrées ?

4.4.4.1. Validation sur différents points de fonctionnement

Étant donné que le modèle sera utilisé sur toute la plage de fonctionnement de la machine électrique, on doit se demander quelle sera la fiabilité de ses résultats pour d'autres points de fonctionnement. Nous définissons trois points de fonctionnement supplémentaires pour cette validation (B, C et D). Leurs caractéristiques sont résumées dans le tableau 4.5. Les pertes sont calculées à partir du modèle électromagnétique par réseau de réluctances décrit dans le chapitre 2.

Tableau 4.5. Points de fonctionnements étudiés pour la validation du modèle LPTN.

Point de fonctionnement	Courant $[A]$	Couple $[N \cdot m]$	Vitesse $[tr \cdot min^{-1}]$	Pertes joules $[W]$	Pertes fer $[W]$
A	89	179	960	934	84
B	190	403	960	4257	89
C	89	179	2500	934	280
D	40	89	5000	189	684

La validation est effectuée à partir de la géométrie de référence de la machine. Les résultats sont analysés pour les différentes valeurs de pertes. Les données importantes issues des simulations sont regroupées dans le tableau 4.6. Voici les tendances principales qui en ressortent :

— concernant les températures :

→ pour les points de fonctionnement A, B et C, où les pertes par effet Joule prédominent, le comportement reste similaire (la forme des profils est identique à la figure 4.18) mais les montées en températures sont plus ou moins importantes. Par exemple, la tête de bobine atteint 340 °C pour le point de fonctionnement B ;

→ on note un changement flagrant de comportement pour le point de fonctionnement D. Les pertes par effet Joule étant réduites au profit des pertes fer, le pic de température observé dans les autres cas pour les têtes de bobines disparaît. La température maximale est de 120 °C environ ;

- ➞ les températures obtenues par le LPTN sont globalement en bon accord avec celles du modèle FEA. Pour le point de fonctionnement D, le LPTN sous-estime légèrement les températures (entre 5 et 10%) ;
- ➞ l'estimation de la température dans les têtes de bobine est précise (écart relatif inférieur à 6%).

— concernant les flux thermiques :

- ➞ globalement la tendance donnée par le modèle éléments finis est bien respectée par le réseau LPTN. On note toutefois une erreur qui revient pour chaque fonctionnement : l'échange entre les encoches et le reste du stator diffère jusqu'à 15% dans les cas A et B ;
- ➞ nous observons le changement de comportement de la machine pour le point de fonctionnement D. Les pertes par effet Joule étant réduites, le flux allant des têtes jusqu'au stator est fortement réduit.

Tableau 4.6. Principaux résultats de la validation sur différents points de fonctionnement.

Point de fonctionnement	T_{end}[1] [°C]	T_{oil}[2] [°C]	P_1[3] [W]	P_{11}[4] [W]
	FEA / LPTN	FEA / LPTN	FEA / LPTN	FEA / LPTN
A	149 / 153	118 / 122	44,2 / 51,6	15,7 / 20
B	329 / 349	192 / 207	202 / 235,2	71,7 / 91,8
C	153 / 156	121 / 124	44 / 51,3	15,5 / 20
D	120 / 118	110 / 110	8,2 / 9,8	2,7 / 3,7

1. Température des têtes de bobine.
2. Température du mélange d'huile qui refroidit les têtes.
3. Puissance échangée *encoche* → *stator*, comme défini sur la figure 4.19.
4. Puissance échangée *tête* → *encoche ext.*.

4.4.4.2. Validation pour différentes géométries

Nous nous intéressons à présent à la robustesse du modèle LPTN vis-à-vis de la géométrie de la machine. Il nous est impossible de valider le modèle pour l'ensemble de la plage de variation des 11 variables géométriques de la machine. En effet, cela demanderait un temps considérable pour réaliser de nombreuses simulations par éléments finis.

Toutefois, rappelons que le modèle par réseau de résistances a été construit via une approche physique puisque les sections et les longueurs des résistances thermiques sont variables avec la géométrie.

Au cours du chapitre 3, nous avons observé des tendances sur la forme globale des machines : plates ou plutôt allongées. Nous présentons ici les résultats de plusieurs simulations avec des évolutions sur la géométrie allant dans ce sens. Étant donné le paramétrage

actuel du modèle FEA, nous faisons varier ici uniquement la profondeur de la machine. Les paramètres de simulation sont résumés dans le tableau 4.7.

Tableau 4.7. Machines étudiées pour la validation géométrique du modèle LPTN.

Cas	Géométrie	profondeur $[mm]$	point de fonctionnement	remarques
1	Référence	75	point A	
2	2	150 ($\times$2)	point A	
3	2	150 ($\times$2)	point A*	*pertes au stator $\times$2
4	3	300 ($\times$4)	point A**	**pertes au stator $\times$4

Les géométries 2 et 3 ont été obtenues en allongeant simplement la profondeur de la machine de référence. Dans les cas 3 et 4, les pertes ont été multipliées en proportion avec l'augmentation des volumes de cuivre et de fer. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4.8.

Tableau 4.8. Principaux résultats de la validation pour différentes géométries.

Cas	T_{end} [°C]	T_{oil} [°C]	P_1 $[W]$	P_{11} $[W]$
	FEA / LPTN	FEA / LPTN	FEA / LPTN	FEA / LPTN
2	137 / 141	110 / 115	42,7 / 52,8	16,4 / 20,8
3	145 / 151	116 / 121	67,8 / 83,8	15,9 / 20
4	144 / 156	115 / 123	114 / 147,6	15,7 / 19,6

Globalement, pour les cas 1 à 3, les modèles LPTN et FEA sont en bon accord. La température des têtes de bobine est légèrement sur-estimée par le LPTN, de 4% au maximum. Les flux dans la machine sont corrects, à l'exception de l'échange entre l'encoche et le reste du stator (*cf.* colonne P_1 du tableau 4.8) qui présente un écart relatif allant jusqu'à 23% par rapport au modèle FEA. Dans le cadre d'une démarche de pré-dimensionnement, nous considérons que cela est acceptable car les tendances sont respectées.

Dans le $4^{ème}$ cas, des différences notables apparaissent. Les températures du carter (+ 13%), des têtes (+ 8%) et de l'huile (+ 7%) sont surestimées par le LPTN. L'échange entre l'encoche et le reste du stator présente une erreur relative de 30%. Notons que les dimensions de cette machine sont extrêmes, et ne sont pas envisageables lors de l'optimisation. On peut supposer que pour des machines très longues, le réseau LPTN pourrait avoir à subir des modifications structurelles, par exemple avec l'ajout d'échanges radiaux en différents points de l'axe de la machine.

Le modèle par réseau de résistances semble donc satisfaisant dans l'optique d'une utilisation en optimisation dans un contexte de pré-dimensionnement. Comme nous le verrons dans la partie 4.6, c'est surtout la mesure de la température des têtes de bobine qui se révélera importante. Sur ce point là, le modèle LPTN est en très bon accord avec

le modèle FEA.

Dans les parties précédentes, nous avons présenté les difficultés qu'il existe afin de modéliser les échanges thermiques dans une machine électrique. Nous avons proposé une approche afin d'obtenir un modèle thermique en régime permanent utilisable en optimisation. Pour cela, un modèle de référence par éléments finis a été construit. Une équivalence entre les phénomènes de convection et de conduction nous a permis de prendre en compte les échanges autour des têtes de bobine. Ensuite, nous avons construit un réseau de résistances thermiques à partir de cette référence. Ce modèle rapide donne des résultats très satisfaisants concernant notamment l'estimation de la température dans les têtes de bobines. La robustesse du modèle vis-à-vis du fonctionnement de la machine ainsi que de sa géométrie a été analysé.

À présent, nous nous intéressons à la sensibilité du modèle par rapport aux paramètres thermiques dont il dépend.

4.5. Incertitude et sensibilité des paramètres thermiques

Les paramètres thermiques du modèle permettent de caractériser le comportement thermique de la machine électrique. Ils sont issus en grande partie des données de la littérature, et notamment de [35]. Cependant, comme nous l'avons décrit précédemment, un certain nombre de ces paramètres sont difficiles à définir avec précision et certitude (dépendance aux matériaux utilisés, procédés de fabrication, géométrie, etc.). Quelle est alors la conséquence d'une telle incertitude sur ces paramètres ? Un certain nombre de travaux proposent des approches pour traiter cette problématique [92, 117].

Nous considérons dans notre travail que le système externe de refroidissement de la machine est fixé. Il est évident que ce système a un impact majeur sur les échauffements dans la machine. Le débit du fluide de refroidissement et sa température sont les paramètres qui ont a priori le plus grand impact sur l'extraction des pertes.

4.5.1. Paramètres étudiés et plages de variation

Nous nous intéressons ici seulement à des paramètres internes à la machine. Les premières simulations nous ont permis de mettre en avant l'influence de certains paramètres, en particulier :

— h_{oil} : le coefficient de convection autour des têtes de bobines ;

— λ_{slrad} : le coefficient de conduction dans les encoches, dans la direction radiale ;

— e_{ctc} : l'épaisseur du contact entre le stator et le carter ;

— e_{slins} : l'épaisseur de l'isolant d'encoche.

Le tableau 4.9 présente certaines données concernant ces paramètres. Les plages de variations qui seront analysées ont été choisies en rapport avec les observations faites dans la littérature.

Tableau 4.9. Données sur les paramètres thermiques pour les études d'incertitude et de sensibilité.

Paramètre	Valeur de référence	Unité	Plage de variation considérée	Référence
h_{oil}	25	$W{\cdot}m^{-2}{\cdot}°C^{-1}$	[25 ; 100]	[35]
λ_{slrad}	4,7	$W{\cdot}m^{-1}{\cdot}°C^{-1}$	[1,6 ; 32]	[111]
e_{ctc}	$6 \cdot 10^{-5}$	m	$[6 \cdot 10^{-5} ; 12 \cdot 10^{-5}]$	[35, 104]
e_{slins}	$19 \cdot 10^{-5}$	m	$[19 \cdot 10^{-5} ; 50 \cdot 10^{-5}]$	[35, 115]

Nous avons abordé plusieurs approches afin d'analyser l'influence de ces paramètres sur les sorties du modèle. Dans une première sous-partie (*cf.* 4.5.2), la méthode des plans d'expériences a été appliquée au modèle FEM. Dans un second temps (*cf.* 4.5.3), nous analyserons l'incertitude et la sensibilité des sorties du modèle LPTN.

4.5.2. Méthode des plans d'expériences appliquée au modèle FEM

La méthode des plans d'expériences nous permet ici d'étudier l'effet simple de chaque paramètre ainsi que les effets d'interaction (entre plusieurs paramètres) sur les températures dans la machine. Nous nous focalisons dans cette sous-section sur trois paramètres (h_{oil}, e_{ctc} et e_{slins}) et 5 températures en sortie :

— T_{end}, la température des têtes de bobine. Dans toutes nos simulations, elle correspond à la température maximale dans la machine ;

— T_{rotor}, la température du rotor. Vue l'homogénéité des températures observée dans cette zone, elle correspond à la température des aimants ;

— T_{oil}, la température du mélange d'huile qui circule autour des têtes. C'est la troisième zone critique de la machine ;

— T_{tooth}, la température des dents au stator ;

— T_{slot}, la température des encoches au stator.

L'étude est menée de la manière suivante :

— Un plan d'expériences complet est construit à partir de toutes les combinaisons de valeurs obtenues à partir de 3 valeurs pour h_{oil} (25, 50 et 100) et de 2 valeurs pour e_{ctc} et e_{slins} (valeurs minimale et maximale décrites dans le tableau 4.9) ;

— Un modèle statistique linéaire généralisé est construit pour chaque température T_k afin de déterminer si les 3 paramètres p_i étudiés permettent d'en expliquer les variations. Le modèle est de la forme :

$$T_k = a_0 + \sum_{i=1}^{3} a_i \cdot p_i + \sum_{\substack{i=1 \\ j>i}}^{3} a_{ij} \cdot p_i \cdot p_j \tag{4.7}$$

Ce modèle a permis d'expliquer plus de 90% de la variabilité de chacune des températures, ce qui est très élevé pour un modèle statistique ;

— Une résolution matricielle au sens des moindres carrés permet alors d'obtenir les coefficients a_i pour chacune des températures ;

— À partir des modèles statistiques ainsi définis, une analyse statistique permet d'étudier l'influence des effets simples et d'interaction. Les effets correspondant à une *p-value* inférieure à 5% sont considérés comme statistiquement significatifs. Cette valeur limite est conventionnelle dans les études statistiques [118]. Les effets simples peuvent alors être quantifiés (part de la variation causée par chaque paramètre), ce qui n'est pas le cas des effets d'interactions.

Tableau 4.10. Proportion de la variation de température engendrée par chaque paramètre (effet simple), et présence/absence d'effets par interaction entre paramètres. Les cases vides correspondent à des effets non statistiquement significatifs (*p-value* supérieure à 5%).

	T_{end}	T_{rotor}	T_{oil}	T_{tooth}	T_{slot}
Effets simples					
h_{oil}	**59%**	17%	8%	13%	15%
e_{ctc}	28%	**80%**	**82%**	**85%**	**51%**
e_{slins}	10%		8%		32%
Effets d'interaction[3]					
$h_{oil} \cdot e_{ctc}$		Sign.	Sign.	Sign.	Sign.
$h_{oil} \cdot e_{slins}$					Sign.
$E_{ctc} \cdot e_{slins}$					

3. On ne peut pas quantifier les effets d'interaction. On notera par *Sign.* les effets qui sont statistiquement significatifs, c'est-à-dire pour lesquels on obtient une *p-value* inférieure à 5%.

Les résultats sont synthétisés dans le tableau 4.10. Notamment, on observe que les variations de h expliquent la majorité (59%) des variations de T_{end}. Si les valeurs de e_{ctc} et de e_{slins} ont aussi une influence sur les valeurs de T_{end}, c'est dans une moindre mesure (respectivement 28% et 10%). Dans ce cas là, les effets d'interaction ne sont pas significatifs. Pour toutes les autres températures, c'est la variation de e_{ctc} qui a le plus

d'influence et des effets d'interactions apparaissent comme statistiquement significatifs, notamment entre h_{oil} et e_{ctc}.

Le tableau 4.11 résume les variations maximales de températures observées lors de la variation de chaque facteur sur sa plage de variation. Nous relevons des écarts allant jusqu'à 15°C dans des zones critiques telles que les têtes de bobine. Cela confirme qu'il est primordial de définir avec précision les paramètres qui causent ces fortes variations (h_{oil} et e_{ctc}) afin d'obtenir précisément les températures des zones critiques.

Tableau 4.11. Résultats issus du plan d'expériences appliqué au modèle FEA : variation maximum de chaque température sur la plage de variation des paramètres. Il faut lire : *"sur sa plage de variation, h_{oil} fait varier T_{end} de 15°C si l'on fixe les autres paramètres"*.

	T_{end}	T_{rotor}	T_{oil}	T_{tooth}	T_{slot}
Effets simples					
h_{oil}	**-15°C**	-5°C	-2°C	-4°C	-6°C
e_{ctc}	+7°C	+8°C	+6°C	+10°C	+8°C
e_{slins}	+4°C		+2°C		+7°C
Effets d'interaction					
$h_{oil} \cdot e_{ctc}$		**-9°C**	**-10°C**	**-13°C**	**-15°C**
$h_{oil} \cdot e_{slins}$					-12°C

4.5.3. Analyse du modèle LPTN

Nous nous intéressons à présent au modèle LPTN. Dans cette sous-partie, nous considérons les 4 paramètres thermiques définis dans le tableau 4.9. Ils pourront prendre toute valeur de l'intervalle défini par leur plage de variation dans ce même tableau. Nous réduisons l'analyse à 4 températures : T_{end}, T_{rotor}, T_{oil} et T_{slot}.

4.5.3.1. Distinction entre analyses d'incertitude et de sensibilité

Nous considérons que le modèle thermique peut être représenté par la fonction f_{th}, permettant de calculer sa sortie Y (dans notre cas, les 4 températures) à partir de ses n entrées $X = (X_1, \ldots, X_n)$, soit $Y = f_{th}(X)$. De manière générale, l'analyse d'incertitude permet de répondre à la question suivante :

Quel est le niveau d'incertitude dans Y résultant des incertitudes dans X ?

L'intérêt principal de cette analyse est donc d'obtenir une information concernant l'incertitude liée à la prédiction d'un modèle. On peut également se demander :

Quelles sont les principales sources d'incertitude parmi les paramètres considérés $(X_1, \ldots, X_n)$?

Cette question est traitée par l'analyse de sensibilité. Il s'agit alors d'identifier les paramètres d'entrée qui ont le plus d'influence sur la sortie. Il sera important d'estimer avec précision les paramètres en question afin d'obtenir une sortie précise. Nous utiliserons ici le calcul des indices de Sobol [119] afin d'analyser la sensibilité des paramètres.

4.5.3.2. Méthodologie générale

Les 3 premières étapes nécessaires aux analyses de sensibilité et d'incertitude sont communes :

Définition des distributions de X - Considérons que le paramètre $X_i (i = 1 \dots n)$ est incertain et appartient à l'intervalle $[X_{i,min}, X_{i,max}]$. Quelle est la probabilité de trouver X_i à un endroit de cet intervalle plutôt qu'à un autre ? Dans notre cas, le sens physique nous pousse à choisir une densité de probabilité uniforme. Une loi de distribution uniforme permet de répartir de manière équiprobable le paramètre sur sa plage de variation.

Génération d'échantillons à partir des distributions - On appelle échantillon un vecteur X comprenant n composantes (valeurs réelles). Pour chaque échantillon, la valeur des composantes étudiées est issue de l'intervalle de variation du paramètre correspondant. Afin de quantifier l'influence de certaines de ces composantes, il faut définir N échantillons. Cette étape est primordiale car elle permet ou non d'obtenir des résultats de qualité. Le nombre d'échantillons N et la méthode pour les générer sont choisis en considérant les critères suivants :

- plus le nombre d'échantillons N est important plus la représentativité des échantillons sera grande (loi des grands nombres). Ainsi, le calcul des indices de sensibilité sera reproductible (résultat final très proche à chaque nouvel échantillonnage). Si le calcul de Y est long (modèle complexe), il faudra trouver un compromis entre représentativité et temps de calcul ;
- concernant l'échantillonneur, de part l'expérience du G2Elab, nous utilisons un tirage aléatoire de type Monte Carlo (convergence d'ordre $1/\sqrt{N}$). Des approches plus rapides existent [120]. Notamment, Sobol préconise d'utiliser la méthode quasi-Monte Carlo, méthode qui utilise des suites à faible discrépance (non-aléatoire) et dont la convergence est de l'ordre de $1/N$. Il pourra être intéressant d'explorer de telles méthodes à l'avenir.

Calcul de Y pour chaque échantillon de paramètres $X(j)$ généré - Il s'agit ici de faire appel au modèle pour chaque échantillon généré. Pour $j = 1 \dots N$ on calcule $Y(j) = f_{th}(X(j))$.

4.5.3.3. Analyse d'incertitude : application au modèle LPTN

L'ensemble des réponses du modèle ($Y(j)$) peuvent être représentées par une courbe de distribution. On choisit de la caractériser par son espérance (moyenne) notée μ et son écart type (racine carrée de la variance) noté σ.

La figure 4.20 présente le résultat obtenu pour la température T_{end} à partir de l'incertitude sur les 4 paramètres thermiques. L'ensemble des résultats est synthétisé dans le tableau 4.12.

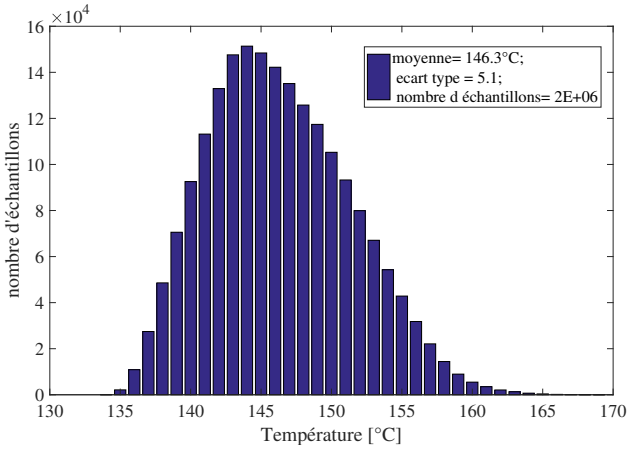


FIGURE 4.20. Répartition de la température obtenues dans les têtes de bobines en considérant la variation des paramètres thermiques comme décrit dans le tableau 4.9.

Tableau 4.12. Résultats de l'analyse d'incertitude sur les températures dans la machine.

	T_{end}	T_{rotor}	T_{oil}	T_{slot}
Moyenne μ [°C]	146,3	122,2	122,5	128,6
Écart type σ [°C]	5,1	2,6	2,2	3,6
Variation maximale [%]	13	6,4	5,4	8,4

Pour des échantillons de taille 20 000, le temps de calcul est de l'ordre de quelques secondes. Cet échantillonnage n'est cependant pas suffisant pour la stabilité des résultats de l'analyse de sensibilité (*cf.* paragraphe 4.5.3.4). On utilise donc ici un échantillonnage de taille N =2 000 000, plus représentatif. En effet, pour cette valeur, les résultats sont reproductibles, c'est-à-dire que pour plusieurs analyses successives, les résultats obtenus sont identiques à 1% près. Le temps de calcul est alors impacté et devient de l'ordre de quelques minutes.

Ainsi la température T_{end} évolue entre 135 et 165°C environ si l'on considère la plage de variation des paramètres décrite plus haut. Cette fourchette représente une variation de 13% autour de la valeur moyenne, ce qui est loin d'être négligeable. On retrouve donc ici une incertitude sur la température des têtes de l'ordre de 15°C comme pour le modèle FEA (*cf.* sous-partie 4.5.2).

4.5.3.4. Analyse de sensibilité : application au modèle LPTN

L'analyse de sensibilité va plus loin que l'analyse d'incertitude. Elle permet en effet de quantifier l'impact de la variation de chaque entrée sur la variation des sorties. Si l'on travaille sur de petites variations des entrées autour de leur valeur de référence, on parle de sensibilité locale. Quant à nous, nous allons utiliser une approche globale, où les paramètres évoluent sur leur domaine complet d'incertitude.

L'estimation des indices de Sobol est une méthode répandue d'analyse de sensibilité globale. Ces indicateurs quantitatifs sont basés sur la variance des sorties du modèle [121]. Le calcul nécessite l'indépendance des paramètres d'entrée, mais aucune hypothèse concernant leur distribution. L'estimation de ces indices peut être réalisée à partir de la méthode proposée par Sobol lui-même (basée sur l'échantillonnage) que nous utiliserons par la suite ; ou bien, par exemple, via des méthodes basées sur l'analyse de Fourier (méthode FAST) [122, 123].

Pour rappel, l'espérance mathématique d'une variable aléatoire X, notée $E(X)$, est la valeur que l'on s'attend à trouver en moyenne si l'on répète un grand nombre de fois la même expérience aléatoire. Elle correspond à la moyenne pondérée des valeurs que peut prendre cette variable.

$$\textit{Propriété de l'espérance} : E(E(Y|X)) = E(Y) \tag{4.8}$$

La variance, notée $Var(X)$, est une mesure servant à caractériser la dispersion d'un échantillon ou d'une distribution.

$$\textit{Définition de la variance} : Var(X) = E[(X - E(X))^2] \tag{4.9}$$

$$\textit{Propriété de la variance (König-Huygens)} : Var(X) = E(X^2) - [E(X)]^2 \tag{4.10}$$

L'indice de Sobol de 1^{er} ordre quantifie l'impact de la variance d'un paramètre X_i sur la sortie du modèle. Il est défini par :

$$S_i = \frac{Var(E(Y|X_i = x_i))}{Var(Y)} \tag{4.11}$$

On a aussi la propriété :

$$Var(Y) = Var(E(Y|X_i = x_i)) + E(Var(Y|X_i = x_i)) \tag{4.12}$$

Ainsi, l'indice de Sobol de 1^{er} ordre est caractérisé par :

— S_i s'approche de 1 si Y est fortement sensible à X_i ;

— S_i s'approche de 0 si Y est peu sensible à X_i.

L'indice de sensibilité de 1^{er} ordre permet de mesurer l'effet principal de chacune des variables X_i en entrée du modèle. En revanche, il ne permet pas de rendre compte de l'interaction des variables entre elles. Il devient alors intéressant de calculer les indices d'ordre supérieur. L'indice de Sobol du second ordre est défini par l'équation 4.13 et l'indice de Sobol total par l'équation 4.14.

$$S_{\substack{ij \\ i \neq j}} = \frac{Var(E(Y|X_i, X_j)) - Var(E(Y|X_i)) - Var(E(Y|X_j))}{Var(Y)} \tag{4.13}$$

$$S_{Ti} = S_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} S_{ij} + \cdots + S_{1...i...n} \tag{4.14}$$

Concernant l'indice de Sobol total, on peut retenir que s'il existe un écart avec la valeur obtenue pour l'indice S_i, alors il existe un effet d'interaction entre le paramètre X_i et un autre paramètre.

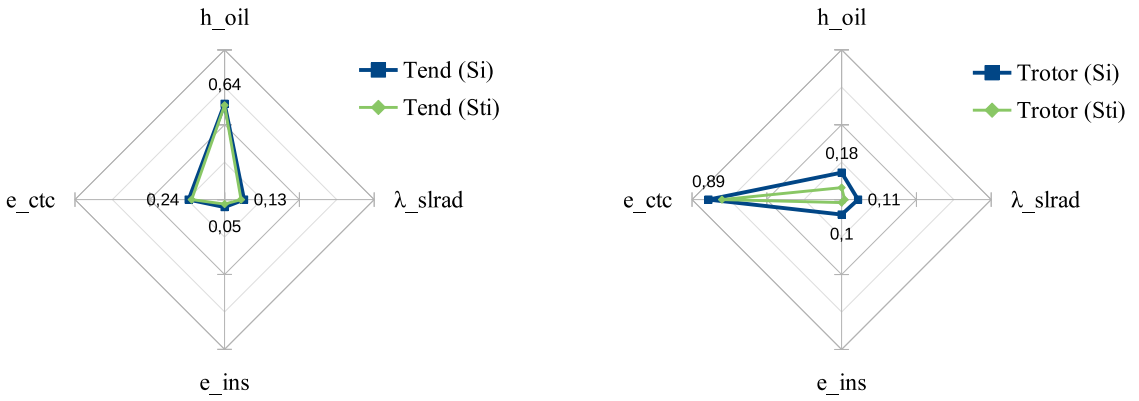
Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4.13. Pour chacune des températures étudiées, l'indice de Sobol de 1^{er} ordre et l'indice total obtenus pour les paramètres thermiques analysés est donné.

Tableau 4.13. Indices de Sobol pour le modèle LPTN. Pour chaque température, l'indice de 1^{er} ordre et l'indice total correspondants à chacun des paramètres étudiés sont donnés sous la forme S_i/S_{Ti}. Les paramètres thermiques peuvent varier sur la plage de variation définie dans le tableau 4.9.

	T_{end}	T_{rotor}	T_{oil}	T_{slot}
h_{oil}	**0,64/0,63**	0,18/0,08	0,12/0,12	0,13/0,15
e_{ctc}	0,24/0,22	**0,89/0,8**	**0,8/0,81**	**0,44/0,45**
e_{slins}	0,05/0,03	0,1/0,02	0,05/0,05	0,12/0,13
λ_{slrad}	0,13/0,11	0,11/0,02	0,01/0,02	0,27/0,29

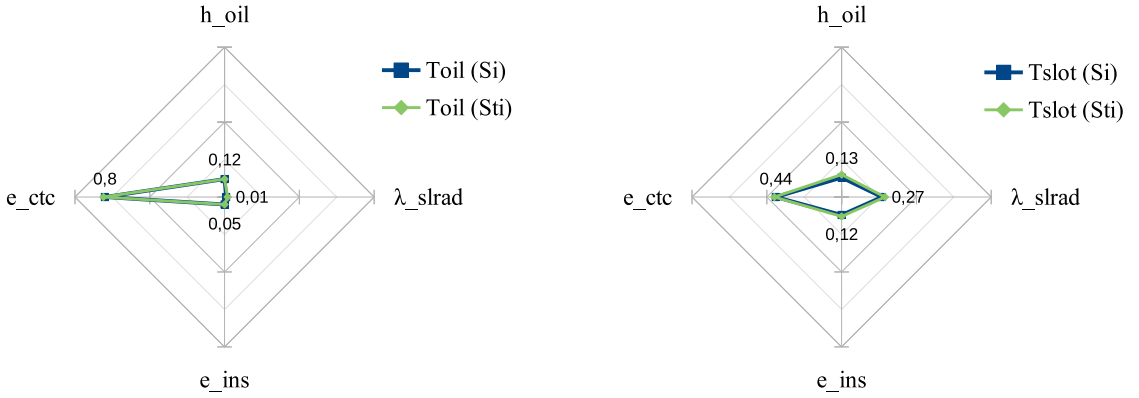
Les figures 4.21(a), 4.21(b), 4.22(a) et 4.22(b) permettent de mieux visualiser la sensibilité de chacune des températures aux paramètres thermiques étudiés.

Globalement, on obtient des tendances très similaires à celles obtenues lors de l'analyse par plans d'expériences du modèle FEA. h_{oil} et e_{ctc} sont les principales sources d'incertitude parmi les paramètres considérés. h_{oil} est le paramètre qui influence le plus la température des têtes de bobine, température maximale dans la machine. L'influence des interactions entre paramètres est faible car les écarts entre les indices de 1^{er} ordre et les indices totaux sont faibles.



(a) T_{end} **(b)** T_{rotor}

FIGURE 4.21. Indices de Sobol de 1^{er} ordre (S_i) et indice total (S_{Ti}) obtenus pour les paramètres thermiques h_{oil}, e_{ctc}, e_{slins} et λ_{slrad}.



(a) T_{oil} **(b)** T_{slot}

FIGURE 4.22. T_{oil} et T_{slot} : indices de Sobol de 1^{er} ordre (S_i) et indice total (S_{Ti}) obtenus pour les paramètres thermiques h_{oil}, e_{ctc}, e_{slins} et λ_{slrad}.

4.5.3.5. Conclusion sur les paramètres les plus influents

Les analyses détaillées ci-dessus ont permis de quantifier l'influence d'une incertitude sur certains paramètres thermiques en entrée du modèle.

L'analyse d'incertitude a permis de montrer que, compte tenu des plages de variation considérées pour les paramètres, l'erreur maximale à envisager est de 13% environ sur la température des têtes de bobines, qui est maximale dans la machine.

L'analyse de sensibilité a permis d'approfondir ce travail en déterminant, à l'aide de la méthode proposée par Sobol, la part de la variation des sorties due à chacune des entrées. Ainsi, on observe que h_{oil} est prépondérant dans la variation de T_{end}, tandis que c'est e_{ctc} qui intervient principalement dans pour les autres températures (T_{rotor}, T_{oil} et

T_{slot}). L'influence d'une interaction entre paramètres existe, mais semble peu importante. Il faut noter que ces résultats sont relatifs :

— aux paramètres étudiés ;

— à la plage de variation considérée ;

— aux températures de sorties analysées ;

— à l'échantillonnage.

Pour conclure, on peut dire qu'un effort particulier devra être porté à la quantification de h_{oil} et de e_{ctc} qui sont les principales sources d'incertitude et de sensibilité parmi les paramètres étudiés.

Remarques : h_{oil} n'étant pas un paramètre physiquement constant (dépendance à la vitesse de l'huile projetée notamment, et donc à celle du rotor), il faudra choisir une valeur la plus représentative possible dans le cadre d'appels au modèle thermique. Une autre possibilité serait de définir une loi de variation du paramètre avec la vitesse. Quant à e_{ctc}, des tests sur une machine électrique réelle peuvent être réalisés afin de déterminer avec précision un tel paramètre.

4.6. Intégration de la contrainte thermique au processus d'optimisation et influence sur le système

Dans cette dernière partie, nous présentons la méthode utilisée pour intégrer la contrainte thermique au problème d'optimisation. Ensuite, nous analysons l'influence de cette contrainte sur le dimensionnement et le fonctionnement du véhicule. Les paramètres dont l'incertitude et la sensibilité ont été étudiées ci-dessus sont fixés à leur valeur de référence (*cf.* tableau 4.9).

4.6.1. Méthode d'intégration et influences

Nous choisissons de faire appel au modèle thermique de la machine électrique lors de la construction de sa cartographie de rendement (*cf.* figure 4.23). Jusqu'à présent, nous ne considérions qu'une contrainte sur la tension à ce niveau, afin de limiter le couple maximal que la machine pouvait délivrer, et une contrainte thermique simple (limitation de la densité de courant à 12 $A \cdot mm^2$).

Suivant une démarche similaire, le modèle thermique est appelé pour chaque couple $\{I_{ME}, \Omega_{ME}\}$ respectant la contrainte en tension. Les points de fonctionnement aboutissant

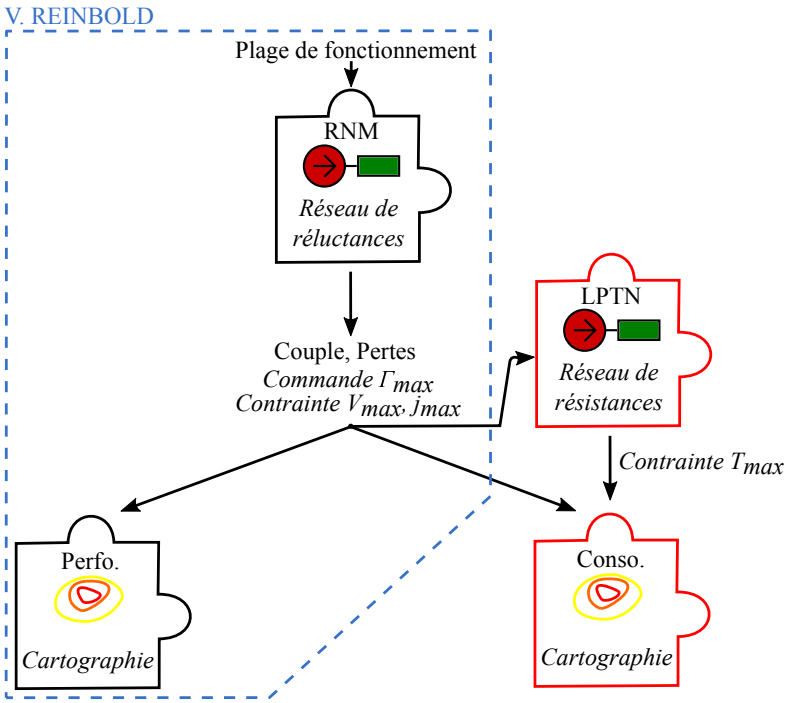


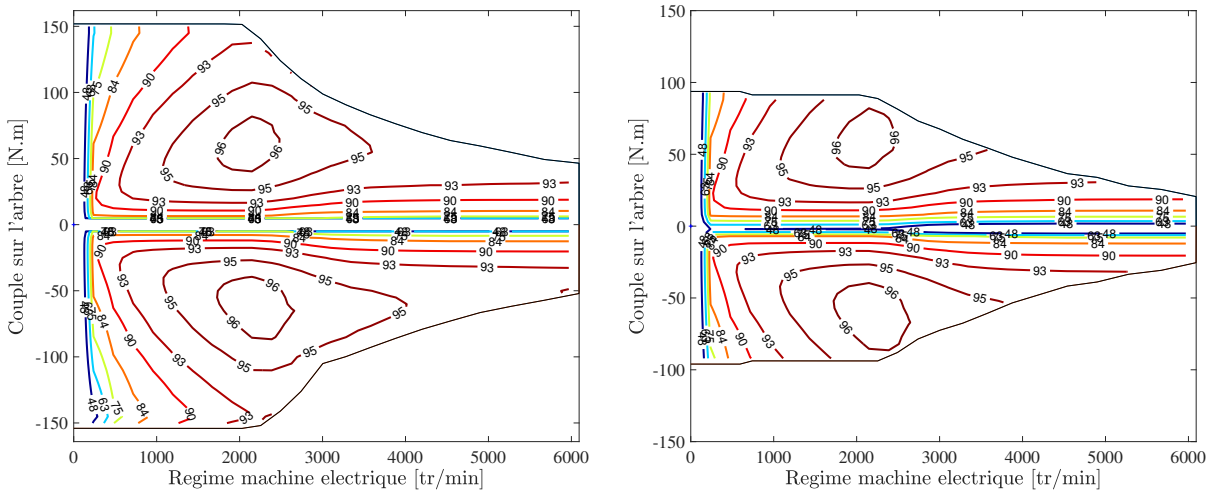
Figure 4.23. Intégration du modèle thermique au processus d'optimisation. Là où V. Reinbold construisait une unique cartographie de rendement (contrainte sur la densité de courant j_{max}), nous en construisons une seconde suite à l'appel au modèle LPTN (contrainte sur les températures) qui sera utilisée lors de l'optimisation énergétique du véhicule.

à un dépassement des contraintes thermiques (cf. tableau 4.2) sont retirés de la cartographie. Ainsi, seuls les points de fonctionnement respectant la contrainte thermique peuvent être sollicités lors de la résolution de l'optimisation énergétique du véhicule.

Toutefois, la contrainte thermique n'est pas prise en compte pour le calcul des performances du véhicule (accélération de 0 à 100 $km \cdot h^{-1}$, temps de dépassement d'un camion roulant à 80 $km \cdot h^{-1}$, vitesse maximale). En effet, nous supposons que ces situations de courte durée n'aboutissent pas à un dépassement des contraintes.

L'appel au modèle thermique allonge la durée nécessaire à la création de la cartographie de rendement. Celle-ci passe de 3,4 à 4 secondes, ce qui reste tout à fait acceptable. Dans le cadre d'une optimisation par un algorithme génétique, nous rappelons qu'une cartographie de rendement de la machine est construite pour chaque individu (c'est-à-dire pour chaque véhicule), et cela à chaque génération.

Les figures 4.24(a) et 4.24(b) donnent un exemple de l'influence de la contrainte thermique sur la cartographie de rendement, avec la modification de l'enveloppe de couple maximal. Sur cette figure, on s'aperçoit que malgré la contrainte thermique, les zones de très bon rendement de la machine restent accessibles. Notons que pour un nombre de pôles élevé (10, 12), la contrainte n'apparaît qu'à faible vitesse. Ce n'est plus le cas lorsque le nombre de pôles est réduit.



(a) Cartographie d'une machine à 4 pôles sans contrainte thermique.

(b) Cartographie de la même machine avec la contrainte thermique.

Figure 4.24. Influence de la contrainte thermique sur la cartographie de rendement. Exemple d'une machine à 4 pôles.

4.6.2. Impact sur le dimensionnement et le fonctionnement global

On se place dans le cas extrême où la température du fluide de refroidissement est de 105 °C, ce qui mène donc à une température pour le carter $T_{cas} = 118$ °C d'après [35]. Dans ces conditions, le processus de dimensionnement par optimisation est appliqué au véhicule. La contrainte thermique est considérée tel que cela a été décrit dans la sous-partie précédente.

4.6.2.1. Dimensionnement du véhicule et de la machine

Nous analysons dans un premier temps les données relatives au dimensionnement obtenues suite à l'optimisation du véhicule sur cycle. À l'image de ce qui a été fait au chapitre 3, le tableau 4.14 présente notamment les résultats obtenus pour les variables $\mathbb{X}_{vh}$, caractérisant les composants du véhicule (hors machine électrique).

Comparativement aux résultats présentés dans le tableau 3.3, qui donnait les mêmes informations mais sans considération de la nouvelle contrainte thermique, on observe plusieurs tendances :

— la puissance mécanique maximale de la machine électrique a augmenté dans chaque cas, cela jusqu'à +30 % pour $p \geq 8$;

— la puissance du moteur thermique est revue légèrement à la hausse quelle que soit la valeur de p ;

Tableau 4.14. Dimensionnements optimaux du système d'entrainement pour des véhicules embarquant environ 28 modules batteries (soit 1,47 kWh et 29,4 kW) avec prise en compte du modèle thermique de la machine.

p	$P_{me}^{meca\ 1}\ (kW)$	$U_{bus}\ (V)$	$P_{mt}\ (kW)$	k_{cpl}	k_{red}
2	42,8	200	37,5	2,11	2,71
4	33,4	203	30,7	1,19	2,68
6	36,6	237,1	31,9	0,81	2,74
8	42	246,2	30,4	0,4	2,75
10	35,4	267,3	30,2	0,4	2,65
12	37,5	324,9	34	0,41	2,64

1. Puissance mécanique maximale de la machine (pas de contrainte thermique).

— les rapports de couplage et de réduction évoluent peu. Toutefois, pour $p \geq 8$, k_{cpl} atteint la valeur minimale autorisée lors de l'optimisation. En relâchant cette contrainte, on pourrait probablement aboutir à des véhicules plus performants.

Si l'on s'intéresse plus précisément à la machine électrique, on relève par rapport aux résultats du chapitre 3 :

— une augmentation des dimensions de celles-ci. Cela sera confirmé par l'analyse des masses un peu plus loin dans cette partie ;

— une légère augmentation de la vitesse de base malgré des rapports de couplage quasiment identiques ;

— une légère diminution de la puissance massique.

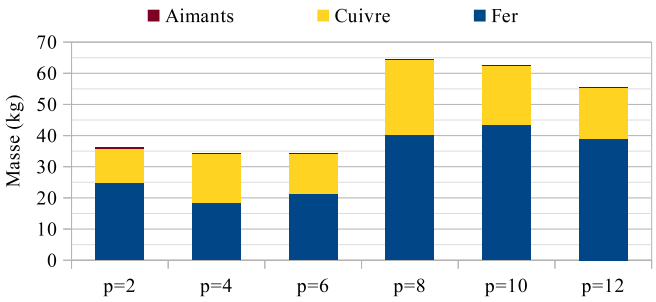
Le tableau 4.15 présente le détail des données obtenues. Il peut être comparé au tableau 3.4 du chapitre précédent.

Tableau 4.15. Caractéristiques des machines embarquées dans les véhicules optimaux à 28 modules batteries, avec prise en compte de la contrainte thermique.

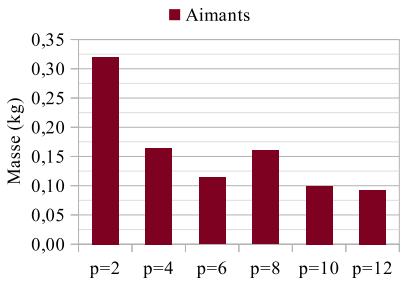
p	$RAD1$ / $R_{ext}{}^{1}\ (mm)$	PROF (mm)	$\Omega_b\ (tr \cdot min^{-1})$	puissance massique (kW/kg)
2	46 / 96,3	127	4 540	1,2
4	50,7 / 93	119,3	2 250	1
6	56,4 / 103,2	105,2	1 240	1,1
8	85 / 139,3	108	590	0,67
10	107,2 / 160,9	80,8	590	0,59
12	101,2 / 148,7	86,1	590	0,7

1. Rayon externe de la machine.

Enfin, les masses des machines embarquées dans les véhicules obtenus par optimisation augmentent fortement. En moyenne, on observe une augmentation de 30% de la masse totale, mais il y a des disparités. Il est difficile de dégager une valeur précise concernant les différents constituants (fer, cuivre et aimant) étant donné les différences selon les cas. On note une rupture flagrante entre les systèmes avec une machine à 6 pôles ou moins (qui pèse alors environ 35 kg) et les systèmes avec une machine à 8 pôles ou plus (qui pèse alors environ 60 kg). Cette tendance, déjà observée au chapitre précédent, est plus marquée avec l'ajout de la contrainte thermique. Les résultats sont synthétisés sur les figures 4.25(a) et 4.25(b).



(a) Masse totale de la machine.



(b) Détail de la masse d'aimant.

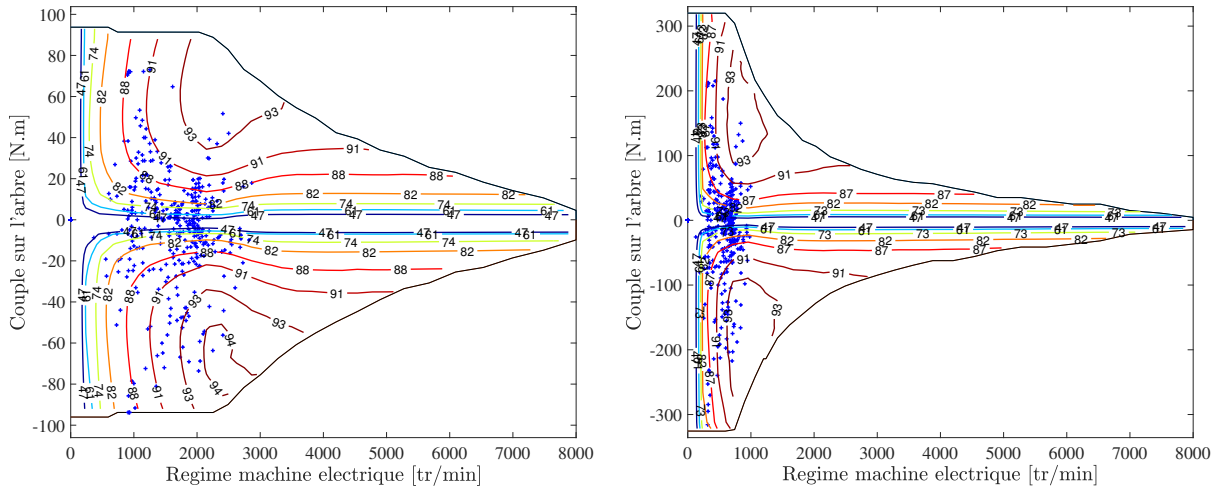
FIGURE 4.25. Comparaison de la masse des machines électriques dans des véhicules du front de pareto et embarquant 28 modules de batterie, selon la valeur de p. La contrainte thermique est prise en compte.

4.6.2.2. Fonctionnement du véhicule et de la machine

Dans ce paragraphe, nous nous focalisons sur l'influence de la nouvelle contrainte thermique sur le fonctionnement du véhicule.

Sur le cycle Hyzem urbain que nous utilisons depuis le début de ce travail, l'optimisation énergétique du véhicule aboutit à une utilisation très similaire du véhicule, que l'on considère la contrainte thermique ou non. Notamment, le fonctionnement de la chaîne de traction électrique ne semble pas être limité, et ce, quel que soit le nombre de pôles de la machine. Dans les faits, on peut imaginer que la machine a évolué au cours du processus d'optimisation afin de permettre une telle utilisation, ce qui pourrait expliquer l'augmentation de puissance et de masse observée dans le paragraphe précédent.

De plus, comme cela est illustré sur les figures 4.26(a) et 4.26(b), les zones à haut rendement de l'association convertisseur/machine (ACM) restent accessibles. En effet, pour $p \geq 4$, l'ACM fonctionne en moyenne à 86% de rendement en phase de traction et à 88% en phase de récupération ce qui est très proche des valeurs relevées lors de l'étude sans contrainte thermique.



(a) Points de fonctionnement (croix bleues) d'une machine à 4 pôles dans un système optimal avec 28 modules de batteries.

(b) Points de fonctionnement (croix bleues) d'une machine à 8 pôles dans un système optimal avec 28 modules de batteries.

Figure 4.26. Représentation des points de fonctionnement de la machine électrique sur la cartographie de rendement de l'association convertisseur/machine.

Le bilan énergétique du véhicule montre peu de différences dans l'utilisation du moteur thermique du véhicule, et cela quel que soit le nombre de pôles. Finalement, la consommation de carburant se trouve très peu impactée par la nouvelle contrainte thermique.

4.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dans un premier temps introduit la problématique de la modélisation thermique des machines électriques, et l'intérêt qu'elle peut avoir dans le cadre de l'étude d'un système tel que le véhicule hybride.

Les méthodes de modélisation de ces phénomènes ont été passées en revue. Nous avons choisi de construire un modèle de référence en régime permanent de la machine synchrone. Ce modèle numérique est basé sur la méthode des éléments finis (FEA). Les échanges convectifs autour des têtes de bobine sont pris en compte grâce à une représentation équivalente du transfert de chaleur dans la cavité (espace baigné dans l'huile autour des têtes de bobines).

Les résultats obtenus grâce au modèle FEA ainsi que les données expérimentales existantes [35] nous ont permis de comprendre les échanges en jeu dans la machine. Grâce à ces informations, nous avons construit un second modèle de la machine : un réseau de résistances thermiques (LPTN). Bien que possédant un maillage plus grossier, ce type de modèle analytique permet d'obtenir les températures dans les zones critiques de la

machine avec une précision acceptable, et dans un temps bien plus court. Il pourra donc être utilisé lors du processus d'optimisation. Le modèle a été construit par rapport à la géométrie de la machine de référence, mais a été validé grâce au modèle FEA pour d'autres géométries et en différents points de fonctionnement.

Toutefois, il existe des incertitudes sur certains paramètres thermiques dans la machine comme cela est relevé dans la littérature. Une analyse d'incertitude via un plan d'expérience a tout d'abord été appliquée au modèle FEA. Ensuite, une analyse de sensibilité a été réalisée sur le modèle LPTN via le calcul des indices de Sobol basés sur la variance. Ces études ont permis de quantifier la sensibilité des températures (sorties des deux modèles) par rapport à une incertitude sur les paramètres (entrées) étudiés. Notamment, nous avons observé des écarts allant de -15 à +10 °C sur la température des têtes de bobine. Le calcul des indices de Sobol nous a permis de mettre en avant l'influence principale du coefficient de convection autour des têtes de bobine (h_{oil}) et de l'épaisseur du contact entre le stator et le carter (e_{ctc}) sur les températures critiques de la machine.

Finalement, le modèle thermique est intégré au processus d'optimisation présenté dans les chapitres précédents. Il intervient pour exprimer des contraintes lors de la construction de la cartographie de rendement de la machine, en limitant le couple disponible pour celle-ci. Ainsi, lors d'une simulation sur cycle, la gestion énergétique du véhicule ne peut faire fonctionner la machine que sur des points respectant les limites thermiques. Cela fait que l'optimisation propose des systèmes avec des machines plus puissantes. Pour cela, les masses de cuivre et d'aimant sont notamment revues à la hausse, ce qui se traduit par une augmentation globale de la masse de la machine. De plus, la limitation thermique permet toujours un fonctionnement à haut rendement de l'association convertisseur/machine. Ainsi, de très faibles écarts sont observés sur la consommation de carburant.

CHAPITRE 5

Application à une architecture hybride série/parallèle

Contenu

5.1. Contexte de l'application 124
5.2. Méthode mise en œuvre 126
5.3. Optimisation du véhicule sur cycle NEDC 127
5.3.1 Paramètres et données utilisées 127
5.3.2 Performances globales des véhicules 128
5.3.3 Dimensionnement et fonctionnement des machines : cas du modèle fin 129
5.4. Conclusion et perspectives 130

Dans ce chapitre, nous appliquons notre méthodologie de dimensionnement à une architecture plus complexe de VEH, comprenant deux machines électriques. Cette étude est une première mise en œuvre du processus global d'optimisation à une autre architecture et ne se veut pas exhaustive. Plusieurs interrogations ont contribué à initier ce travail :

— l'optimisation conjointe du dimensionnement et de la gestion énergétique d'un tel véhicule aboutira-t-elle à des dimensionnements et des fonctionnements distincts pour les 2 machines ?

— le gain en terme de consommation de carburant apporté par des architectures complexes peut-il être atteint si l'on dimensionne avec finesse les machines d'une architecture plus simple ?

5.1. Contexte de l'application

Jusqu'ici, nous avions fixé l'architecture du VEH pour le dimensionnement par optimisation. Cependant, comme cela a été présenté au chapitre 2, il existe de nombreuses manières d'agencer les composants dans de tels véhicules. Cet agencement est un levier supplémentaire, en plus du dimensionnement des composants et de la gestion énergétique, qui doit permettre d'améliorer encore plus l'efficacité des VEH. Toutefois, des architectures plus complexes entraînent des sur-coûts pour les constructeurs, et le gain en terme d'efficacité n'est pas nécessairement important. Il est alors intéressant de chercher l'architecture avec le meilleur compromis complexité/efficacité.

Des premiers travaux allant dans cette direction [26, 124] ont été réalisés au Laboratoire Transports et Environnement (LTE) par Bilal Kabalan, doctorant en thèse Cifre avec le groupe PSA. Ces travaux se concentrent sur la recherche d'architectures présentant le meilleur compromis complexité/consommation. Dans un premier temps, les architectures de type série/parallèle sont étudiées. On distingue deux catégories :

— les architectures purement série/parallèle pouvant fonctionner en mode série ou en mode parallèle (mais pas dans un mode intermédiaire). Un exemple simple est donné sur la figure 5.1. On peut citer l'exemple du modèle Cleanova de Dassault, ou encore le modèle 3008 de PSA, qui possède une architecture série/parallèle par la route (ou *through the road*, *cf.* figure 5.2) ;

— les architectures à dérivation de puissance (ou *power split*) comme le THS (*Toyota Hybrid System*, *cf.* figure 5.3). Dans ce cas, la présence d'un train épicycloïdal permet un mode de fonctionnement intermédiaire entre les modes série et parallèle.

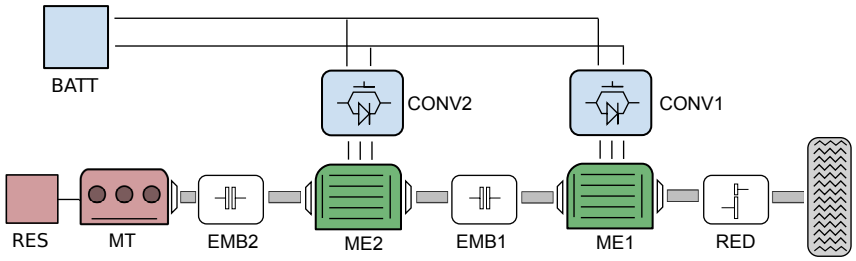


FIGURE 5.1. Architecture série/parallèle SPHEV1.

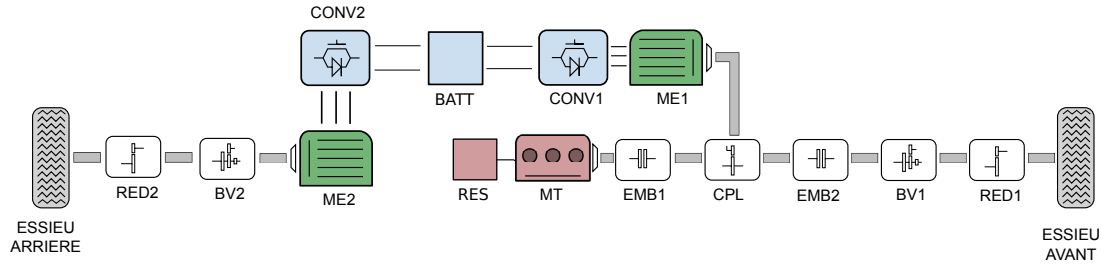


FIGURE 5.2. Architecture série/parallèle *through the road*.

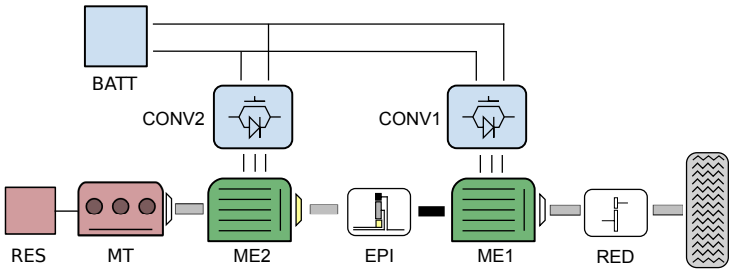


FIGURE 5.3. Architecture à dérivation de puissance : le THS (*Toyota Hybrid System*).

L'architecture la moins complexe, SPHEV1 (*cf.* figure 5.1), a déjà été étudiée dans [125]. Elle est visiblement moins efficace que l'architecture de la Toyota Prius (*cf.* figure 5.3) si l'on considère des modèles simples pour les machines électriques, sous forme de cartographie (seule la puissance maximale est considérée comme variable) [26, 27]. En effet, lorsque le processus d'optimisation décrit jusqu'ici est appliqué à ces deux architectures, l'architecture SPHEV1 mène à une consommation plus élevée (+4%) que l'architecture THS pour une mission avec des conditions de conduite mixtes (urbain, rural puis autoroutier). D'autres comparaisons entre différentes architectures ont été effectuées dans [27].

Ce résultat s'explique par la liberté de fonctionnement supplémentaire apportée au moteur thermique, dans le cas du THS. En effet, le train épicycloïdal permet d'ajuster la vitesse du moteur pour trouver un point de fonctionnement avec un bon rendement, et cela quelle que soit la vitesse des roues. L'architecture SPHEV1 ne dispose pas d'une telle liberté car de simples embrayages permettent de dissocier le moteur des roues.

En résumé, B. Kabalan s'intéresse aux possibilités offertes par ces architectures en considérant des critères tels que la complexité, le coût et l'efficacité (consommation de carburant). Notre objectif dans ce chapitre est de voir si l'optimisation fine des machines électriques de l'architecture SPHEV1 pourrait permettre d'améliorer l'efficacité du véhi-

cule (et dans quelle mesure, le cas échéant), tout en conservant la simplicité propre à cette architecture.

5.2. Méthode mise en œuvre

Dans ce travail, nous nous focalisons donc sur l'architecture SPHEV1 présentée sur la figure 5.1. Nous appliquons à cette architecture embarquant deux machines électriques la méthodologie présentée précédemment. Pour rappel, c'est une approche imbriquée, constituée d'une boucle principale consacrée au dimensionnement par optimisation, et d'une boucle interne réalisant l'optimisation énergétique des véhicules. L'algorithme NSGA-II est l'algorithme d'optimisation principal et la programmation dynamique résout le problème de gestion énergétique. Deux approches sont utilisées pour modéliser les machines électriques.

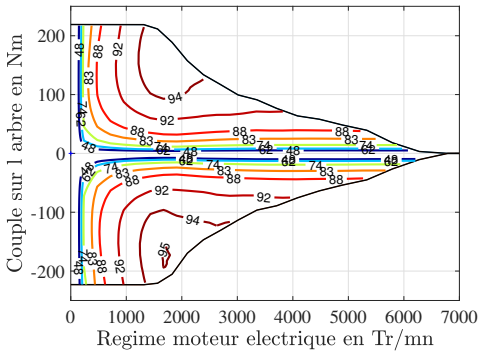
— La première approche utilise un modèle simple qui englobe la machine et le convertisseur statique. Ce modèle présente une unique variable d'entrée : P_{acm}, la puissance de l'association convertisseur/machine (ACM). Concrètement, faire varier P_{acm} correspond à l'application d'un coefficient de proportionnalité aux différentes données de la machine (couple, pertes, masse). La cartographie initiale est celle correspondant à la machine la plus puissante de la Toyota Prius (*cf.* figure 5.4(a)).

— La seconde approche utilise un modèle fin de la machine, dissocié du convertisseur statique. Il est identique à celui qui a été introduit au chapitre 2 puis utilisé dans les chapitres suivants. La géométrie de chaque machine est paramétrée par 10 variables comme cela est rappelé sur la figure 5.4(b). Le nombre de pôles est fixé à 8 (comme pour la machine électrique la plus puissante de la Prius).

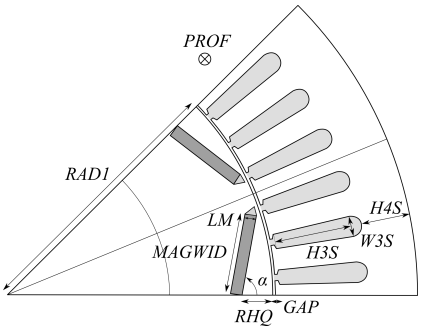
Nous proposons les deux cas d'études synthétisés dans le tableau 5.1. Dans le cas 1, le modèle simple est utilisé pour les deux machines de l'architecture alors que dans le cas 2, c'est le modèle fin qui est utilisé.

Tableau 5.1. Cas d'étude pour l'optimisation de l'architecture SPHEV1.

Cas	Nombre de variables de dimensionnement	Liste des variables de dimensionnement
Cas 1	5	P_{acm1} ; P_{acm2} ; N_{bat} ; P_{mt} ; k_{red}
Cas 2	25	$\mathbb{X}_{me1}$; U_{bus1} ; $\mathbb{X}_{me2}$; U_{bus2} ; N_{bat} ; P_{mt} ; k_{red}



(a) Modèle simple : cartographie de rendement issue du modèle de l'association convertisseur/machine (ACM1) de la Toyota Prius 2004 (*cf.* figure 5.3). Notons que le modèle thermique est considéré.



(b) Modèle fin : description des variables géométriques associées à la machine électrique ($\mathbb{X}_{me}$).

Figure 5.4. Distinction entre le modèle simple et le modèle fin de la machine

5.3. Optimisation du véhicule sur cycle NEDC

5.3.1. Paramètres et données utilisées

Les simulations sont effectuées sur le cycle normalisé européen NEDC. Ce cycle simple est principalement composé d'une phase urbaine et d'une phase extra-urbaine. Même s'il est peu représentatif des conditions réelles de conduite, il nous permet de visualiser rapidement s'il y a une erreur dans les simulations, ce qui est intéressant en phase de développement.

Concernant le problème d'optimisation, les variables ont été définies dans la partie précédente (*cf.* tableau 5.1). Les contraintes et les objectifs que nous considérons sont présentés ci-dessous.

— Les objectifs à minimiser sont :
  → J_1, la consommation de carburant (en $l/100\ km$) ;
  → N_{bat}, le nombre de modules de la batterie.

— Les contraintes de performances dynamiques du véhicule à respecter (données par PSA) sont :
  → $t_{0-100} < 12\ s$, temps mis par le véhicule pour accélérer de 0 à 100 $km \cdot h^{-1}$;
  → $t_{80-120} < 9\ s$, temps mis par le véhicule pour accélérer de 80 à 120 $km \cdot h^{-1}$;
  → $V_{max} > 140\ km \cdot h^{-1}$, vitesse maximale du véhicule ;

La plupart des données utilisées pour le véhicule sont issues du modèle de la Prius. On peut les retrouver dans [126]. Notamment, on peut souligner :

— la masse du véhicule : 1360 kg ;

— la loi de route (c'est-à-dire la force de résistance à l'avancement du véhicule) liée à la vitesse V du véhicule, qui est de la forme :

$$F_{res} = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot V + \alpha_3 \cdot V^2 \quad avec \quad \begin{cases} \alpha_1 = 152 \\ \alpha_2 = 0 \\ \alpha_3 = 0.4095 \end{cases} \tag{5.1}$$

— le carburant : moteur essence.

5.3.2. Performances globales des véhicules

Les fronts de pareto présentant les solutions optimales pour les cas 1 et 2 sont présentés sur la figure 5.5. Le modèle fin de la machine permet un gain légèrement supérieur à 2% sur la consommation des véhicules appartenant au front de pareto et embarquant 25 modules de batterie (cas que nous détaillerons par la suite). Rappelons que cette valeur est obtenue pour le cycle NEDC.

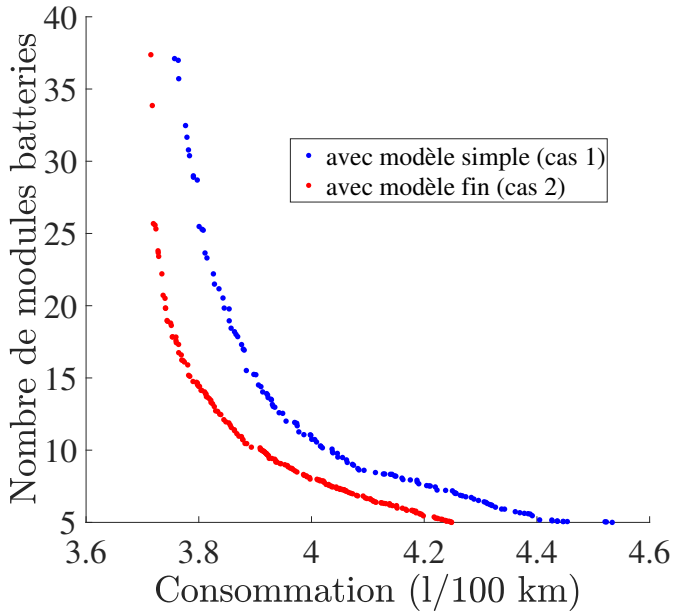


Figure 5.5. Fronts de pareto pour les deux cas d'optimisation de l'architecture SPHEV1. Le cas 1 est représenté en bleu tandis que le cas 2 est en rouge.

Cette différence est notamment la conséquence de pertes moins importantes dans l'association convertisseur/machine 1 (ACM1, c'est-à-dire ME1+CONV1, *cf.* figure 5.1) lors de la mission. Le détail du bilan d'énergie du véhicule est présenté dans le tableau 5.2. L'utilisation du modèle fin pour les machines électriques permet donc d'aboutir à des véhicules globalement plus efficaces.

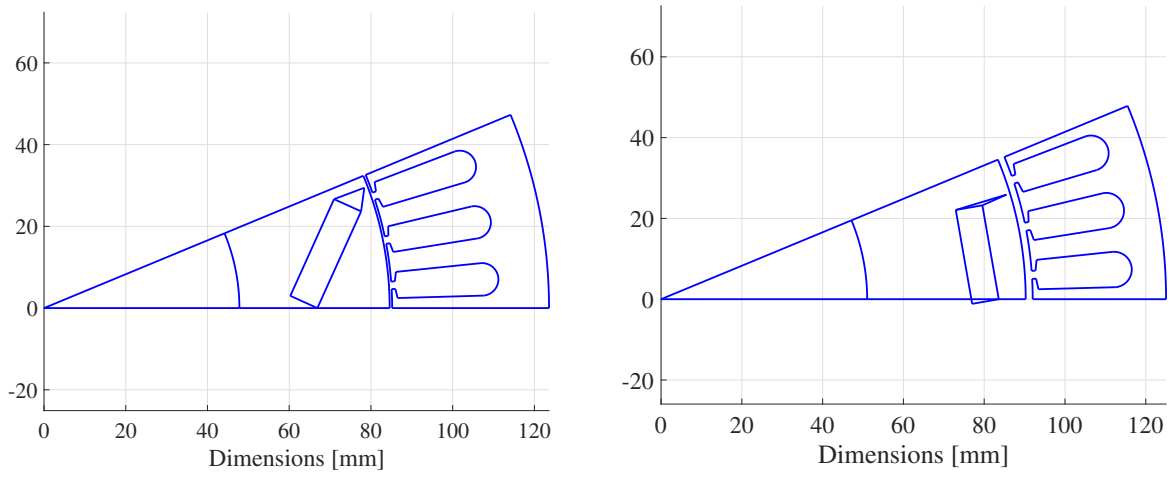
Tableau 5.2. Bilan d'énergie des véhicules optimaux SPHEV1 embarquant 25 modules batteries. Toutes les données sont en $W \cdot h \cdot km^{-1}$.

Cas	Énergie aux roues	Énergie accessoires	Pertes ACM1	Pertes ACM2	Pertes batterie	Pertes réducteur	Total
Cas 1	87.2	7.4	13	6	4.2	4.4	122.2
Cas 2	87.1	7.4	11.1	6.3	3.5	4.4	119.8

5.3.3. Dimensionnement et fonctionnement des machines : cas du modèle fin

On s'intéresse à présent plus en détail aux machines électriques obtenues par la procédure d'optimisation dans des véhicules embarquant 25 modules de batterie. On analyse ici les résultats du cas 2 pour comprendre s'il existe des différences entre les 2 machines d'une même architecture. On pourra utiliser les figures 5.4(a) et 5.4(b) comme références puisqu'elles présentent respectivement la cartographie de rendement du modèle de l'ACM1 et la géométrie de la ME1 de la Prius.

Les figures 5.6(a) et 5.6(b) présentent les géométries obtenues pour les machines dans le cas 2. Des détails supplémentaires sont donnés dans le tableau 5.3.



(a) Géométrie de la ME1.

(b) Géométrie de la ME2.

Figure 5.6. Géométrie des machines dans des véhicules SPHEV1 optimaux à 25 modules de batteries.

D'un point de vue géométrique, les deux machines d'un même système optimal sont assez différentes. La ME1 (la plus proche des roues) est plutôt conventionnelle par rapport à ce que l'on a pu observer jusqu'ici. Au contraire, la ME2 est assez atypique, avec un grand entrefer et l'absence de concentration du flux des aimants (inclinaison supérieure à 90°).

Tableau 5.3. Principales différences obtenues pour les deux machines de l'architecture SPHEV1 dans le cas 2. Les données de la machine de référence (Prius) sont présentées.

Machine	Rayon interne/externe $[mm]$	Profondeur $[mm]$	Entrefer $[mm]$	Inclinaison des aimants $[rad]$
Prius (ME2)	92 / 141	85	0.6	1.4
ME1	82.3 / 120	111	0.63	1.16
ME2	90.3 / 125	80.6	1.73	1.74

Remarque : quelle que soit la valeur de N_{bat} choisie par la procédure d'optimisation, nous aboutissons à des structures similaires à ce qui est présenté sur les figures 5.6(a) et 5.6(b) pour la géométrie respective des deux machines d'un même véhicule.

Ces différences sur la géométrie peuvent s'expliquer par des fonctionnements bien distincts pour les deux machines. Cela est illustré sur les figures 5.7(a) et 5.7(b).

— La machine ME1, directement liée aux roues du véhicule, fonctionne à des vitesses allant de 0 à 3000 $tr \cdot min^{-1}$ et pour des couples compris entre 0 et 150 $N \cdot m$ environ. La plage de vitesse est directement imposée par le cycle de fonctionnement et le rapport de réduction final (RED). Notons qu'au delà de 2000 $tr \cdot min^{-1}$, la machine fonctionne avec un couple quasiment nul (couple de frottement) ;

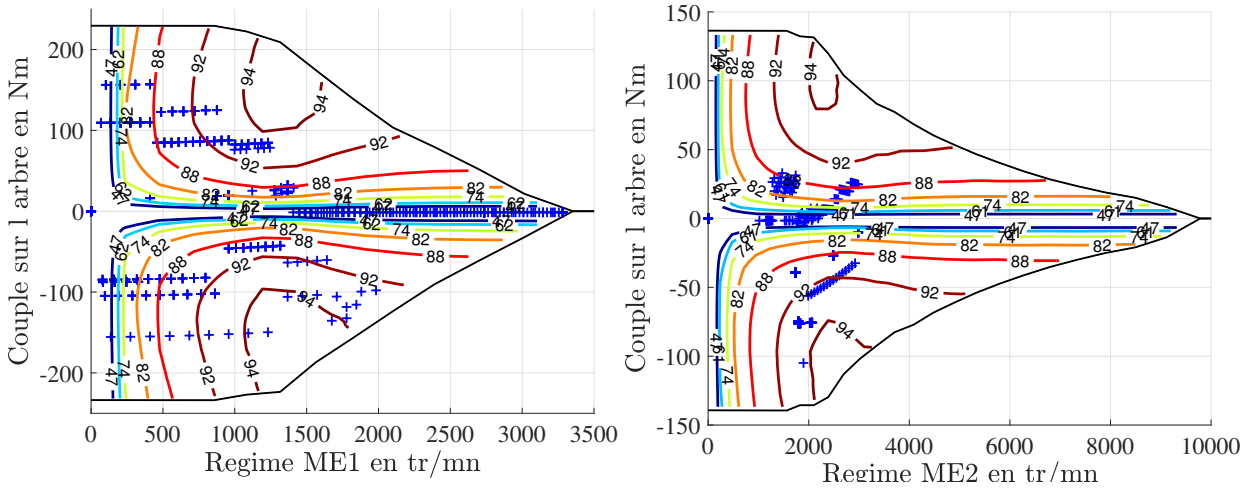
— Au contraire, le fonctionnement de la ME2 est beaucoup plus spécifique, avec une plage de fonctionnement plus réduite par rapport aux possibilités offertes par la cartographie. Cette machine fournit du couple à haute vitesse (25 $N \cdot m$ @ 3000 $tr \cdot min^{-1}$), avec un rendement supérieur à 88%, ce qui n'est pas le cas pour la ME1.

On montre une nouvelle fois le fort couplage qui existe entre le dimensionnement des composants (ici la machine électrique), le cycle d'utilisation (mission du véhicule) et la gestion énergétique.

5.4. Conclusion et perspectives

Dans ce chapitre, nous avons exploré l'application de la méthodologie de dimensionnement par optimisation à un véhicule hybride avec une architecture de type série/parallèle. L'architecture SPHEV1, possédant deux machines électriques, a été retenue pour sa simplicité (absence de boîte de vitesses, un seul rapport de réduction (réducteur final)).

Nous avons montré dans ces premiers travaux que l'utilisation d'un modèle fin pour les machines électriques (plutôt qu'un modèle simple sous forme de cartographie) permet un gain sur la consommation de carburant du véhicule sur cycle d'utilisation. Cette



(a) Cartographie de rendement de ACM1.

(b) Cartographie de rendement de ACM2.

Figure 5.7. Cartographie de rendement des ACM dans des véhicules SPHEV1 optimaux à 25 modules de batteries (cas 2).

tendance sera à confirmer et à quantifier pour d'autres missions, et par rapport à des architectures plus complexes. L'enjeu de ce travail pourra être de trouver un compromis complexité/efficacité du véhicule.

Nous avons également mis en avant les fortes différences qu'il existe entre les deux machines de l'architecture, tant sur la géométrie de celles-ci que sur leur fonctionnement.

Dans des travaux futurs, on pourra introduire le nombre de pôles comme variable supplémentaire. Nous avons en effet vu au chapitre 3 que la réduction du nombre de pôles de la machine permettait des fonctionnements à haute vitesse avec des bons rendements. On pourra également réaliser l'optimisation de l'architecture de la Prius (avec des modèles fins pour les machines électriques) afin de comparer les performances en terme de consommation de carburant.

Conclusion générale et perspectives

Lors de cette thèse, nous avons poursuivi le travail de Vincent Reinbold sur une méthodologie de dimensionnement d'un système énergétique. Appliquée ici au véhicule électrique hybride, cette méthode pourrait tout à fait être utilisée pour bien d'autres systèmes au cœur des enjeux environnementaux actuels (énergies renouvelables intermittentes, bâtiment "intelligent", etc.). Celle-ci permet la conception fine d'un composant du système (dans notre cas, la machine électrique) en considérant son environnement direct (les autres composants de la chaîne de traction) et les interactions qui régissent le système (mission et gestion énergétique).

Après avoir introduit le contexte de notre travail au chapitre 1, le chapitre 2 nous a permis de positionner cette méthodologie et de présenter ces fonctionnalités. Notre travail a porté sur l'approfondissement de cette approche, tant sur l'aspect de la modélisation de la machine électrique que sur certaines limites méthodologiques relevées en conclusion du travail de V. Reinbold. Les principales contribution que nous avons apportées sont reprises ci-dessous. Finalement, nous ouvrons à notre tour de nouvelles perspectives.

Principales contributions

Concernant la modélisation

- **Réduction du modèle électromagnétique par réseau de réluctances de la machine électrique (chapitre 3)** : nous avons mis en œuvre la possibilité de prendre en compte les anti-périodicité dans le logiciel Reluctool. Cela a permis de diviser par deux les schémas à résoudre et donc de réduire les temps de calcul ;

- **Élaboration d'un modèle thermique de la machine électrique (chapitre 4)** : nous avons proposé une méthode afin de construire un modèle thermique de la machine adapté à l'optimisation. Cette méthode est découpée en différentes phases.

  — Tout d'abord, nous construisons un modèle de référence par éléments finis à partir de données issues de la littérature. Des données expérimentales sont utilisées. Les échanges autour des têtes de bobine sont considérés grâce à une méthode spécifique ;

— Ensuite, nous analysons les phénomènes en jeu et les principaux chemins du flux thermique ;

— Enfin, nous construisons un modèle analytique par réseau de résistances thermiques grâce aux résultats précédents.

Concernant les aspects méthodologiques

- **Prise en compte d'une variable discrète dans le processus d'optimisation (chapitre 3)**. Cela est appliqué au nombre de pôles de la machine électrique qui est ainsi considéré comme une variable supplémentaire du problème d'optimisation ;

- **Analyse de la sensibilité basée sur la variance (chapitre 4)** : certains paramètres du modèle thermique sont difficiles à définir avec précision et certitude car ils peuvent dépendre des matériaux utilisés, des procédés de fabrication ou encore de la géométrie de la machine. Nous avons proposé d'appliquer la méthode de Sobol au modèle par réseau de résistances thermiques, ce qui nous permet de quantifier l'influence de ces paramètres sur les échauffements dans la machine ;

- **Intégration d'une contrainte d'optimisation s'appuyant sur le modèle thermique (chapitre 4)** : nous formulons une nouvelle contrainte dans le problème d'optimisation. Celle-ci limite la température maximale dans le cuivre, température obtenue via le modèle thermique analytique. Les points de fonctionnement dépassant cette contrainte sont retirés de la cartographie de rendement de la machine, et ne sont donc pas utilisables lors de la gestion énergétique du véhicule.

Concernant l'implémentation logicielle

- **Utilisation du formalisme des composants logiciel MUSE (annexe C)** : le modèle électromagnétique paramétré de la machine est inséré dans un composant logiciel MUSE. Cela nous permet de travailler avec les dernières versions des logiciels utilisés (CADES, Matlab) et des nouvelles fonctionnalités dont ils disposent (anti-périodicité notamment). Ainsi, le temps de calcul global du processus est réduit d'un facteur 3 (soit 5 h au lieu de 15 h sur PC).

Concernant l'analyse du système

- **Analyse de l'influence du nombre de pôles de la machine électrique (chapitre 3)** : nous montrons que cette nouvelle variable a un impact important sur le fonctionnement de la chaîne électrique, et sur la géométrie et l'encombrement (masse, volume) de celle-ci. Toutefois, la variation du rapport de couplage entre les chaînes thermique et électrique permet une adaptation du système à la variation du nombre de pôles (cas de l'architecture hybride parallèle). La consommation du véhicule sur cycle d'utilisation est donc peu impactée ;

- **Analyse de la sensibilité de certains paramètres thermiques (chapitre 4)** : le calcul des indices de Sobol nous permettent de souligner l'impact du contact entre le carter et le stator ainsi que du coefficient de convection autour des têtes de bobine sur les températures dans les différentes zones critiques de la machine. Il est donc important de les évaluer avec une précision correcte au vu de l'approche de dimensionnement par optimisation ;

- **Analyse de l'influence de la contrainte thermique basée sur le modèle par réseau de résistances (chapitre 4)** : les systèmes obtenus par optimisation présentent des machines plus puissantes, avec des masses de cuivre et d'aimants revues à la hausse par rapports aux résultats obtenues sans cette contrainte. De plus, la limitation thermique permet toujours un fonctionnement à haut rendement de l'association convertisseur/machine. Ainsi, de très faibles écarts sont observés sur la consommation de carburant.

Concernant l'application à une autre architecture

- **Application à une architecture série/parallèle (chapitre 5)** : le processus de dimensionnement par optimisation est appliqué à une architecture constituée, notamment, de deux machines électriques (*cf.* chapitre 5). Nous montrons que l'utilisation d'un modèle fin de la machine électrique (par rapport à un modèle simple (cartographie)) permet une réduction de la consommation de carburant du véhicule sur une mission. Nous observons de fortes différences sur le fonctionnement et la géométrie des machines obtenus dans un même véhicule après optimisation du système.

Perspectives

Suite à ce travail, de nombreuses perspectives sont ouvertes, tant sur les aspects de la modélisation que de la méthodologie.

Concernant la modélisation

- **Modélisation thermique de la machine électrique** : À l'échelle du composant, on pourra notamment approfondir les travaux sur la modélisation thermique de la machine. Par exemple, le paramétrage complet du modèle par éléments finis permettra d'étudier le comportement thermique d'autres géométries de machines. De plus, les têtes de bobines pourraient être redéfinies avec plus de finesse (outils Flux3D dédié).

  Concernant le modèle analytique, l'utilisation de l'outil Thermotool qui permet de générer automatiquement le modèle Matlab utilisé en optimisation facilitera les modifications structurelles du réseau de résistances thermiques. Cet outil est actuellement développé dans le cadre de la suite CADES ;
- **Modélisation électromagnétique de la machine électrique** : enrichir le calcul des pertes dans la machine par une modélisation plus fine.

Concernant les aspects méthodologiques

- **Intégration de la contrainte thermique** : L'intégration du couplage entre les phénomènes magnétiques et thermiques est également une piste intéressante. En effet, nous ne considérons pas pour l'instant le problème implicite qui existe entre les pertes et les températures dans la machine (influence réciproque) ;
- **Intégration de modèles fins des autres composants** : comme nous l'avons fait pour la machine, des modèles fins du moteur thermique et des batteries pourraient être intégrés au modèle complet du véhicule. Des travaux vont actuellement dans ce sens au Laboratoire Transports et Environnement. Cela permettra de considérer la pollution et le vieillissement du système de stockage comme des objectifs d'optimisation ;
- **Re-formulation du problème d'optimisation pour mieux traiter les variables discrètes** : Une autre piste concerne la formulation du problème d'optimisation pour la considération directe des variables discrètes. Comme nous l'avons souligné dans le chapitre 3, nous nous heurtons pour le moment à un problème d'élitisme des solutions, ce qui nous oblige à traiter le problème mixte comme un ensemble de problèmes continus. Il s'agirait par exemple de transposer certaines

variables en une proportion de la machine : une proportion d'ouverture des aimants plutôt qu'un angle d'inclinaison, une proportion de largeur d'encoche plutôt qu'une largeur tout court, etc.

Concernant l'application à d'autres architectures

- **Application aux architectures série/parallèle et à dérivation de puissance** : L'application de la méthodologie de dimensionnement par optimisation à une architecture multi-machines a été initiée au chapitre 5. Nos travaux pourront être utilisés pour travailler sur des architectures série/parallèle plus complexes et sur des architectures à dérivation de puissance. On pourra également travailler avec d'autres missions pour le véhicule afin de confirmer ou non les premières observations.

Bibliographie

[1] V. Reinbold, "*Méthodologie de dimensionnement d'un moteur électrique pour vehicules hybrides. Optimisation conjointe des composants et de la gestion d'énergie* ", Universite de Grenoble, 2014.

[2] International Energy Agency, "*Key world energy statistics* ", 2017.

[3] Ministère de la transition écologique et solidaire, "*Consommation finale d'énergie tous secteurs* ", URL.

[4] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.), "*Climate Change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* ", 2014.

[5] NASA Goddard Institute for Space Studies, "*GISTEMP Team, 2018 : GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP)* ", URL.

[6] J. Hansen, R. Ruedy, M. Sato, and K. Lo, "*Global surface temperature change* ", Reviews of Geophysics, vol. 48, no. 4, 2010. DOI.

[7] Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique (CITEPA), "*CITEPA, Format SECTEN (avril 2017)* ", avril 2017.

[8] World Health Organization, "*« 7 Million Deaths Annually Linked to Air Pollution », communiqué de presse* ", Genève, 25 Mars 2014. URL.

[9] Santé publique France, "*Impacts sanitaires de la pollution de l'air en France : nouvelles données et perspectives, communiqué de presse* ", 21 juin 2016. URL.

[10] United States Environmental Protection Agency, "*Press Release : EPA, California Notify Volkswagen of Clean Air Act Violations / Carmaker allegedly used software that circumvents emissions testing for certain air pollutants* ", September 18, 2015. URL.

[11] Association négaWatt, "*Les grandes lignes du scénario négaWatt 2017-2050* ", Septembre 2017. URL.

[12] "*LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte* ", Août 2015. URL.

[13] E. Figenbaum, T. Assum, and M. Kolbenstvedt, "*Electromobility in Norway : experiences and opportunities* ", Research in Transportation Economics, vol. 50, pp. 29–38, 2015.

[14] Association pour le développement de la mobilité électrique (AVERE-France), "*Les grands constructeurs comptent investir plus de 90 milliards de dollars dans l'électrique* ", Janvier 2018.

[15] T. Götschi, J. Garrard, and B. Giles-Corti, "*Cycling as a part of daily life : a review of health perspectives* ", Transport Reviews, vol. 36, no. 1, pp. 45–71, 2016.

[16] Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), "*Report modal* ", URL.

[17] Association pour le développement de la mobilité électrique (AVERE-France), "*Le baromètre de la mobilité électrique* ", 2017.

[18] European Automobile Manufacturers' Association, "*Alternative fuel vehicle registrations (2017)* ", Janvier 2018. URL.

[19] Fondation pour la Nature et l'Homme et European Climate Foundation, "*Etude : le véhicule électrique dans la transition écologique en France* ", Mai 2016 - Novembre 2017. URL.

[20] Arrobas, Daniele La Porta ; Hund, Kirsten Lori ; Mccormick, Michael Stephen ; Ningthoujam, Jagabanta ; Drexhage, John Richard, "*The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future* ", July, 18 2017. URL.

[21] C. C. Chan, "*The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles* ", Proceedings of the IEEE, vol. 95, no. 4, pp. 704–718, 2007.

[22] A. Khaligh and Z. Li, "*Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles : State of the art* ", IEEE transactions on Vehicular Technology, vol. 59, no. 6, pp. 2806–2814, 2010.

[23] K. Ç. Bayindir, M. A. Gözüküçük, 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.

[24] G. Wu, X. Zhang, and Z. Dong, "*Powertrain architectures of electrified vehicles : review, classification and comparison* ", Journal of the Franklin Institute, vol. 352, no. 2, pp. 425–448, 2015.

[25] K. Jonasson, P. Strandh, M. Alaküla, *et al.*, "*Comparative study of generic hybrid topologies* ", *Electric Vehicle Symposium*, vol. 18, 2001.

[26] B. Kabalan, E. Vinot, Y. Cheng, R. Trigui, and C. Dumand, "*Improvement of a Series-Parallel Hybrid Electric Vehicle Architecture* ", *VPPC*, Institute of Electrical and Electronics Engineers-IEEE, 2017.

[27] E. Vinot, "*Comparison of different power-split hybrid architectures using a global optimisation design method* ", International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, vol. 8, no. 3, pp. 225–241, 2016.

[28] J. Scordia, "*Systematic approach of the sizing optimization and the elaboration of energy management laws for an hybrid vehicle* ", Université Henri Poincaré - Nancy I, Nov. 2004. URL.

[29] E. Gibson, K. van Blommestein, J. Kim, T. Daim, and E. Garces, "*Forecasting the electric transformation in transportation : the role of battery technology performance* ", Technology Analysis & Strategic Management, vol. 29, no. 10, pp. 1103–1120, 2017.

[30] S. M. Lukic, J. Cao, R. C. Bansal, F. Rodriguez, and A. Emadi, "*Energy storage systems for automotive applications* ", IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 55, no. 6, pp. 2258–2267, 2008.

[31] T. Finken, M. Felden, and K. Hameyer, "*Comparison and design of different electrical machine types regarding their applicability in hybrid electrical vehicles* ", *Electrical Machines, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on*, pp. 1–5, IEEE, 2008.

[32] L. Kumar and S. Jain, "*Electric propulsion system for electric vehicular technology : A review* ", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 29, pp. 924–940, 2014.

[33] J. Hsu, C. Ayers, and C. Coomer, "*Report on Toyota/Prius motor design and manufacturing assessment* ", Federal Register, pp. 1–15, 2004.

[34] J. Hsu, C. Ayers, C. Coomer, R. Wiles, S. Campbell, K. Lowe, and R. Michelhaugh, "*Report on Toyota/Prius Motor Torque-Capability, Torque-Property, No-Load Back EMF, and Mechanical Losses* ",. United States. Department of Energy, 2004.

[35] ORNL, "*Report on toyota prius motor thermal management* ", 2005.

[36] Oak Ridge National Laboratory, "*Evaluation of 2004 Toyota Prius hybrid electric drive system* ", 2006.

[37] R. Trigui, B. Jeanneret, B. Malaquin, and C. Plasse, "*Performance comparison of three storage systems for mild HEVs using PHIL simulation* ", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 58, no. 8, pp. 3959–3969, 2009.

[38] M. André, "*Driving patterns analysis and driving cycles, within the project : European Development of Hybrid Technology approaching efficient Zero Emission Mobility (HYZEM)* ", INRETS report, n LEN, vol. 9709, p. 47, 1997.

[39] X. ROBOAM, "*Conception systémique pour la conversion d'énergie électrique 1 : approche intégrée par optimisation* ",. Lavoisier, 2012.

[40] European Federation for Transport and Environment AISBL, "*Mind the Gap 2016 : Fixing Europe's flawed fuel efficiency tests* ", December 2016. URL.

[41] M. Andre, "*Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions-Part A : The ARTEMIS European driving cycles* ", IFSTTAR-Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux, 2009.

[42] E. Silvas, T. Hofman, N. Murgovski, L. P. Etman, and M. Steinbuch, "*Review of optimization strategies for system-level design in hybrid electric vehicles* ", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 66, no. 1, pp. 57–70, 2017.

[43] H. K. Fathy, J. A. Reyer, P. Y. Papalambros, and A. Ulsov, "*On the coupling between the plant and controller optimization problems* ", *American Control Conference, 2001. Proceedings of the 2001*, vol. 3, pp. 1864–1869, IEEE, 2001.

[44] C.-C. Lin, H. Peng, J. W. Grizzle, and J.-M. Kang, "*Power management strategy for a parallel hybrid electric truck* ", IEEE transactions on control systems technology, vol. 11, no. 6, pp. 839–849, 2003.

[45] 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.

[46] 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, Citeseer, 1999.

[47] C. Desai and S. S. Williamson, "*Optimal design of a parallel hybrid electric vehicle using multi-objective genetic algorithms* ", *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC'09. IEEE*, pp. 871–876, IEEE, 2009.

[48] 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.

[49] W. Gao and C. Mi, "*Hybrid vehicle design using global optimisation algorithms* ", International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, vol. 1, no. 1, pp. 57–70, 2007.

[50] 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.

[51] 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* ", IFAC Proceedings Volumes, vol. 44, no. 1, pp. 13052–13057, 2011.

[52] 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.

[53] V. Reinbold, L. Gerbaud, and E. Vinot, "*Joint optimization of control and sizing of the parallel HEV using SQP algorithm* ", *13th International Workshop on Optimization and Inverse Problems in Electromagnetism*, 2014.

[54] M. R. Bussieck and S. Vigerske, "*MINLP solver software* ", Wiley encyclopedia of operations research and management science, 2014.

[55] C. LEMARÉCHAL, "*Optimisation continue* ",. Ed. Techniques Ingénieur, 2002.

[56] S. Boyd and L. Vandenberghe, "*Convex optimization* ",. Cambridge university press, 2004.

[57] M. Sakarovitch, "*Optimisation combinatoire.[2], Programmation discrète : méthodes mathématiques et algorithmiques* ", 1984.

[58] "*Network-Enabled Optimization System (NEOS)* ", URL.

[59] A. Seshadri, "*A fast elitist multiobjective genetic algorithm : NSGA-II* ", MATLAB Central, vol. 182, 2006.

[60] P. Zhang, F. Yan, and C. Du, "*A comprehensive analysis of energy management strategies for hybrid electric vehicles based on bibliometrics* ", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 48, pp. 88–104, 2015.

[61] H.-D. Lee and S.-K. Sul, "*Fuzzy-logic-based torque control strategy for parallel-type hybrid electric vehicle* ", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 45, no. 4, pp. 625–632, 1998.

[62] G. Paganelli, T.-M. Guerra, S. Delprat, J.-J. Santin, M. Delhom, and E. Combes, "*Simulation and assessment of power control strategies for a parallel hybrid car* ", vol. 214, pp. 705–717, 07 2000.

[63] F. Yan, J. Wang, and K. Huang, "*Hybrid Electric Vehicle Model Predictive Control Torque-Split Strategy Incorporating Engine Transient Characteristics* ", vol. 61, pp. 2458–2467, 07 2012.

[64] S. Kermani, "*Gestion énergétique des véhicules hybrides : de la simulation à la commande temps réel.* ", Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2009.

[65] L. Serrao, S. Onori, and G. Rizzoni, "*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.

[66] R. Bellman, "*Dynamic programming and Lagrange multipliers* ", Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, vol. 42, no. 10, pp. 1–767, 1956.

[67] E. Vinot and R. Trigui, "*Optimal energy management of HEVs with hybrid storage system* ", Energy Conversion and Management, vol. 76, pp. 437–452, 2013.

[68] 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.

[69] P. Caillard, "*Conception par optimisation d'une chaine de traction électrique et de son contrôle par modélisation multi-physique* ", Ecole Centrale de Lille, 2015.

[70] L. Chen, J. Wang, and P. Lazari, "*Influence of driving cycles on traction motor design optimizations for electric vehicles* ", *Transport Research Arena (TRA) 5th Conference : Transport Solutions from Research to Deployment*, 2014.

[71] B. Du Peloux, "*Modélisation des actionneurs électromagnétiques par réseaux de reluctances. Création d'un outil métier dédié au prédimensionnement par optimisation* ", Thèse de doctorat de l'INP de Grenoble, 9 octobre, 2006.

[72] H. BEN AHMED, N. Bernard, G. Feld, and B. Multon, "*Machines synchrones : fonctionnement en régime permanent* ", Techniques de l'ingénieur. Génie électrique, vol. 6, no. D3522, 2007.

[73] H. BEN AHMED, N. Bernard, G. Feld, and B. Multon, "*Machines synchrones : Fonctionnement en régime autopiloté* ", Techniques de l'ingénieur. Génie électrique, vol. 6, no. D3524, 2010.

[74] Z. Zhu and D. Howe, "*Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles* ", Proceedings of the IEEE, vol. 95, no. 4, pp. 746–765, 2007.

[75] B. Multon and L. Hirsinger, "*Problème de la motorisation d'un véhicule électrique, 1ère partie* ", revue 3EI, pp. 1–53, 1995.

[76] S. Küttler, "*Dimensionnement optimal de machines synchrones pour des applications de véhicules hybrides* ", Université de Technologie de Compiègne, 2013.

[77] M. Liwschitz-Garik, L. Maret, and J.-D. Chatelain, "*Calcul des machines électriques* ",. Spes, 1967.

[78] 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, vol. 3, no. 3, pp. 139–167, 2008. DOI.

[79] B. Delinchant, D. Duret, L. Estrabaut, L. Gerbaud, H. Nguyen Huu, B. Du Peloux, H. L. Rakotoarison, F. Verdière, and F. Wurtz, "*An optimizer using the software component paradigm for the optimization of engineering systems* ", COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, vol. 26, no. 2, pp. 368–379, 2007.

[80] "*http ://muse-component.org/* ",

[81] "*http ://fmi-standard.org/* ",

[82] S. Robert, B. Delinchant, B. Hilaire, and Y. Tanguy, "*PLUMES : Towards a unified approach to building physical modeling* ", Proceedings of Building Simulation 2013, 2013.

[83] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, "*Numerical recipes in C* "„ vol. 2. Cambridge university press Cambridge, 1996.

[84] B. Sesanga N'Tshuika, "*Optimisation de Gammes : Application à la Conception des Machines Synchrones à Concentration de Flux* ", Université de Grenoble, 2011.

[85] 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, vol. 43, no. 1-2, pp. pp–115, 2013.

[86] J. Le Besnerais, V. Lanfranchi, M. Hecquet, and P. Brochet, "*Multiobjective optimization of induction machines including mixed variables and noise minimization* ", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, no. 6, pp. 1102–1105, 2008.

[87] J. Arora, M. Huang, and C. Hsieh, "*Methods for optimization of nonlinear problems with discrete variables : a review* ", Structural optimization, vol. 8, no. 2-3, pp. 69–85, 1994.

[88] A. M. El-Refaie and T. M. Jahns, "*Scalability of surface PM machines with concentrated windings designed to achieve wide speed ranges of constant-power operation* ", *Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference on*, pp. 7–pp, IEEE, 2005.

[89] D. G. Dorrell, M.-F. Hsieh, M. Popescu, L. Evans, D. A. Staton, and V. Grout, "*A review of the design issues and techniques for radial-flux brushless surface and internal rare-earth permanent-magnet motors* ", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 9, pp. 3741–3757, 2011.

[90] M. L. Idoughi, "*Extraction de modèles thermiques simplifiés des machines électriques à partir d'un calcul du champ de températures* ", Université Paris Sud-Paris XI, 2011.

[91] V. Mihaila, M. Q. Nguyen, S. Duchesne, G. Velu, D. Roger, D. Malec, and J. P. Cambronne, "*Solutions d'isolation électrique pour les machines fonctionnant à Hautes Températures* ", *Symposium de Génie Électrique 2014*, 2014.

[92] B. Assaad, "*Contribution à la prise en compte des aspects thermiques des machines électriques dans un environnement mécatronique* ", Compiègne, 2015.

[93] A. Boglietti, A. Cavagnino, D. Staton, M. Shanel, M. Mueller, and C. Mejuto, "*Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines* ", IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 56, no. 3, pp. 871–882, 2009.

[94] S. Nategh, O. Wallmark, M. Leksell, and S. Zhao, "*Thermal analysis of a PMaSRM using partial FEA and lumped parameter modeling* ", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 27, no. 2, pp. 477–488, 2012.

[95] P. Mellor, D. Roberts, and D. Turner, "*Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design* ", *IEE Proceedings B (Electric Power Applications)*, vol. 138, pp. 205–218, IET, 1991.

[96] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, and M. Pastorelli, "*A simplified thermal model for variable-speed self-cooled industrial induction motor* ", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 39, no. 4, pp. 945–952, 2003.

[97] Altair, "*Altair Flux*". http://www.altairhyperworks.com/product/flux, Sept. 2017. URL.

[98] J. Driesen, R. J. Belmans, and K. Hameyer, "*Finite-element modeling of thermal contact resistances and insulation layers in electrical machines* ", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, no. 1, pp. 15–20, 2001.

[99] C. Jungreuthmayer, T. Bauml, O. Winter, M. Ganchev, H. Kapeller, A. Haumer, and C. Kral, "*A detailed heat and fluid flow analysis of an internal permanent magnet synchronous machine by means of computational fluid dynamics* ", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 12, pp. 4568–4578, 2012.

[100] A. B. Nachouane, A. Abdelli, G. Friedrich, and S. Vivier, "*Etude des Echanges Thermiques par Convection Autour des Têtes des Bobines d'un Alterno-Démarreur Intégré par des Méthodes Numériques de type CFD* ", *Symposium de Genie Electrique*, 2016.

[101] S. T. Lundmark, A. Bergqvist, and S. D. Chakarova-Käck, "*Coupled 3-D thermal and electromagnetic modelling of a liquid-cooled IPM traction motor* ",

[102] V. Co., "*RARE EARTH PERMANENT MAGNETS VACOdyM & VACOMAx*". http://www.vacuumschmelze.com/fileadmin/Medienbiliothek_2010/Downloads/DM/VACODYM-VACOMAX-PD002_2015_en.pdf, 2015. URL.

[103] A. Boglietti, A. Cavagnino, and D. Staton, "*Determination of critical parameters in electrical machine thermal models* ", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 44, no. 4, pp. 1150–1159, 2008.

[104] 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* ", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, no. 3, pp. 620–628, 2005.

[105] J. Holman, "*Heat transfer, 1997* ", P rocess E fficiency [%], vol. 20, pp. 40–60, 1998.

[106] G. Mills, J. Weaver, G. Harris, W. Chen, J. Carrejo, L. Johnson, and B. Rogers, "*Detection of subsurface voids using scanning thermal microscopy* ", Ultramicroscopy, vol. 80, no. 1, pp. 7–11, 1999.

[107] E. Schubert, "*Heat transfer coefficients at end winding and bearing covers of enclosed asynchronous machines* ", Elektrie, vol. 22, pp. 160–162, 1968.

[108] G. Stokum, "*Use of the results of the four-heat run method of induction motors for determining thermal resistance* ", Elektrotechnika, vol. 62, no. 6, pp. 219–232, 1969.

[109] A. Boglietti and A. Cavagnino, "*Analysis of the endwinding cooling effects in TEFC induction motors* ", *Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE*, vol. 2, pp. 797–804, IEEE, 2006.

[110] C. Kral, A. Haumer, M. Haigis, H. Lang, and H. Kapeller, "*Comparison of a CFD analysis and a thermal equivalent circuit model of a TEFC induction machine with measurements* ", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 24, no. 4, pp. 809–818, 2009.

[111] J. Lutun, "*Modélisation thermique des alternateurs automobiles* ", Université de Grenoble, 2012.

[112] Y. Bertin, "*Refroidissement des machines électriques tournantes* ", Techniques de l'ingénieur. Génie électrique, vol. 6, no. D3460, pp. D3460–1, 1999.

[113] M. Bouafia, A. Ziouchi, Y. Bertin, and J.-B. Saulnier, "*Étude expérimentale et numérique des transferts de chaleur en espace annulaire sans débit axial et avec cylindre intérieur tournant* ", International journal of thermal sciences, vol. 38, no. 7, pp. 547–559, 1999.

[114] A. Fasquelle, "*Contribution à la modélisation multi-physique : électro-vibro-acoustique et aérothermique de machines de traction* ", Ecole Centrale de Lille, 2007.

[115] R. Balke and D. Cipriani, "*Channel, shaped, laminated, high temperature slot wedge for dynamoelectric machines* ", Mai 22 1973.

[116] S. Touhami, Y. Bertin, Y. Lefèvre, J.-F. Llibre, C. Henaux, and M. Fenot, "*Lumped Parameter Thermal Model of Permanent Magnet Synchronous Machines* ", *Electrimacs 2017*, pp. pp–1, 2017.

[117] A. Boglietti, A. Cavagnino, and D. A. Staton, "*TEFC induction motors thermal models : A parameter sensitivity analysis* ", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 3, pp. 756–763, 2005.

[118] L. Wasserman, "*All of statistics : a concise course in statistical inference* ",. Springer Science & Business Media, 2013.

[119] I. M. Sobol, "*Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates* ", Mathematics and computers in simulation, vol. 55, no. 1-3, pp. 271–280, 2001.

[120] M. Grandjacques, "*Analyse de sensibilité pour des modèles stochastiques à entrées dépendantes : application en énergétique du bâtiment* ", Grenoble Alpes, 2015.

[121] A. Saltelli, P. Annoni, I. Azzini, F. Campolongo, M. Ratto, and S. Tarantola, "*Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total*

sensitivity index ", Computer Physics Communications, vol. 181, no. 2, pp. 259–270, 2010.

[122] R. Cukier, C. Fortuin, K. E. Shuler, A. Petschek, and J. Schaibly, "*Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients. I Theory* ", The Journal of chemical physics, vol. 59, no. 8, pp. 3873–3878, 1973.

[123] S. Tarantola, D. Gatelli, and T. A. Mara, "*Random balance designs for the estimation of first order global sensitivity indices* ", Reliability Engineering & System Safety, vol. 91, no. 6, pp. 717–727, 2006.

[124] B. Kabalan, Y. CHENG, E. Vinot, C. Dumand, R. Trigui, and W. Bou Nader, "*Optimal Design and Sizing of Through-The-Road Hybrid Vehicle Powertrain* ", *SIA POWERTRAIN conference*, 2018, Rouen.

[125] R. Trigui, E. Vinot, and B. Jeanneret, "*Backward Modeling and Energy Management Optimization of a Two-Clutches Series-Parallel HEV for Efficiency Assessment* ", IFAC Proceedings Volumes, vol. 45, no. 21, pp. 422–427, 2012.

[126] 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, vol. 3, no. 3, pp. 139–167, 2008.

[127] 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.

Annexes

ANNEXE A

L'algorithme NSGA-II

L'algorithme NSGA-II (*Non-domination Sorting Genetic Algorithm*) est un algorithme d'optimisation de type méta-heuristique. De manière générale, ce type d'algorithmes fonctionne par apprentissage des caractéristiques d'un problème afin de trouver une approximation de la meilleure solution. Un processus itératif stochastique est généralement appliqué. Souvent, les méthodes méta-heuristiques s'inspirent du vivant : *optimisation par essaims particulaires, algorithmes de colonies de fourmis, etc.*

A.1. Fonctionnement général et vocabulaire

Dans ce travail, nous avons utilisé l'algorithme NSGA-II tel qu'il est décrit dans [59]. L'algorithme s'inspire de la théorie de l'évolution et du concept de sélection naturelle. Il repose sur différentes notions :

- l'individu : solution potentielle au problème d'optimisation ;
- la population : ensemble d'individus ;
- la génération : population générée à la fin de chaque itération de l'algorithme. Elle est définie par une quantité précise d'individus ;
- les parents/enfants : individus initiaux/finaux lors de l'étape d'évolution de la population. Attention, tous les enfants ne feront pas partis de la nouvelle génération.

Au cours du processus d'optimisation, les individus sont conservées ou écartées selon leur capacité à remplir un ou plusieurs objectifs. Des procédés d'évolution permettent d'élaborer de nouvelles solutions à partir de la génération précédente. Globalement, les individus s'adaptent au problème d'optimisation.

Le processus est décrit plus en détail ci-dessous. Suite à l'initialisation aléatoire d'une population et à leur évaluation selon les objectifs de l'optimisation, un processus itératif est appliqué :

- tri des individus sur le principe de non-domination ;
- sélection d'une population de parents via un tournoi ;

— évolution aléatoire des parents, donnant naissance à une population d'enfants ;

— tri de la population constituée des parents et des enfants sur le principe de non-domination ;

— création d'une nouvelle génération à partir des meilleurs individus de cette dernière population.

Le processus prend fin lorsque la condition d'arrêt (i.e. le nombre de générations N_{gen}) est atteint. Les mécanismes intégrés dans chacune de ces étapes sont détaillés par la suite.

A.2. Mécanismes et réglages de l'algorithme

A.2.1. Initialisation d'une population

Chaque individu d'une population est une potentielle solution au problème d'optimisation. En d'autres termes, un individu est un jeu de valeurs correspondant aux variables d'optimisation. Chaque individu est initialisé aléatoirement en respectant les ensembles de définition de chacune des variables et les contraintes du problème.

Exemple : la puissance du moteur thermique est tirée au sort sur une plage allant de 20 à 70 kW.

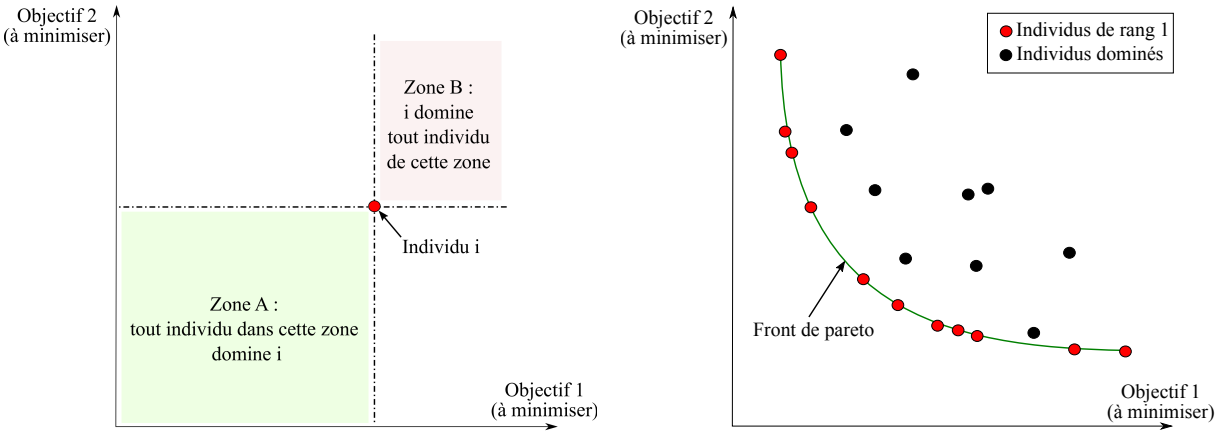
Le premier réglage de l'algorithme est donc la taille de la population à chaque génération : N_{ind}. En augmentant ce paramètre, on augmente la couverture du problème d'optimisation et donc la probabilité de s'approcher rapidement d'un optimum global. Toutefois, cela nécessite un plus grand nombre d'appels à la fonction objectif, ce qui allonge la durée de résolution. La complexité de l'algorithme augmente avec le carré de la taille des générations [127].

A.2.2. Évaluation et tri

Chaque individu est évalué par un appel à la fonction objectif. Si l'on cherche à minimiser M objectifs (problème multi-objectif), alors on peut positionner l'individu dans un espace à M dimensions en fonction des résultats obtenus.

Dans ce cadre là, la notion de meilleur individu n'a plus de sens et une méthode spécifique doit être utilisée afin de trier les individus. Celle-ci repose sur le concept d'individu non-dominé, tel qu'il est défini par la figure A.1(a) (cas à 2 objectifs).

L'ensemble des individus non-dominés appartiennent au front de pareto (*cf.* figure A.1(b)). On leur attribue le rang 1. Ensuite, on retire les individus de rang 1 de



(a) Définition du concept dominé/non-dominé pour l'optimisation multi-objectifs, où les objectifs 1 et 2 sont à minimiser.

(b) Définition du concept de front de pareto.

FIGURE A.1. Le front de pareto est l'ensemble des individus non-dominés, c'est-à-dire pour lesquels il n'existe aucun autre individu dans leur propre zone A.

la population à trier, puis on recherche les individus non-dominés de la population restante. On leur attribue le rang 2, et ainsi de suite.

De plus, on attribue un indice de proximité (*crowding distance*) à chaque individu. Cet indice correspond à la distance euclidienne séparant chaque individu de ses voisins directs de même rang. On attribue une distance infinie aux individus se trouvant aux extrémités de chaque front (*cf.* figure A.2).

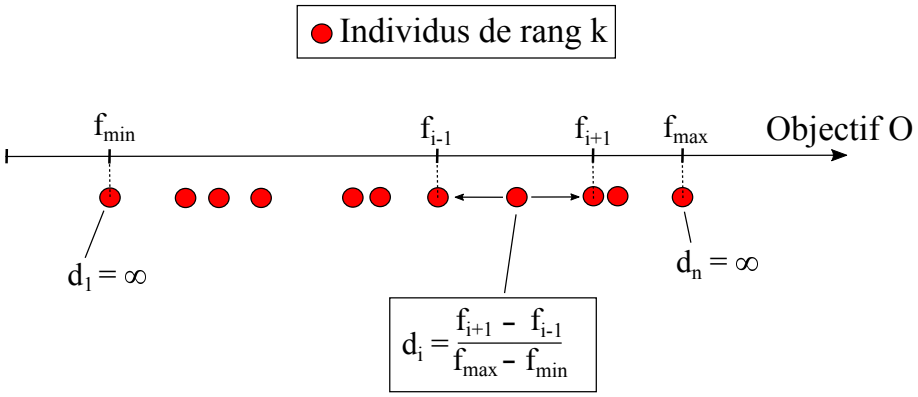


FIGURE A.2. Calcul de la *crowding distance* pour un individu i de rang k selon l'objectif O.

L'algorithme effectue alors le tri suivant : les individus sont classés du rang le plus faible au rang le plus élevé, puis pour les individus de même rang, les individus avec un grand indice de proximité sont classés devant les individus avec un faible indice.

Le tri par rang permet de privilégier les individus les plus performants (i.e. qui minimisent le plus les objectifs) et l'indice de proximité permet d'assurer une meilleure diversité dans la population en agrandissant le front de pareto.

A.2.3. Sélection

Cette étape peut être assimilée au processus de sélection naturelle. Les individus les plus adaptés à l'environnement ont un avantage leur permettant de se reproduire et de transmettre leur patrimoine génétique, ce qui améliore globalement l'adaptation.

Dans l'algorithme, c'est un tournoi binaire qui est utilisé. Deux individus sont tirés au sort parmi la génération étudiée. L'individu le mieux classé (rang le plus faible puis indice de proximité le plus élevé en cas d'égalité) est sélectionné dans la population de parents. Notons qu'il n'est pas possible de sélectionner 2 fois le même individu.

Deux paramètres permettent le réglage du tournoi de sélection :

— la taille de la population de parents (*pool*). Dans notre cas, nous considérons qu'elle vaut $N_{ind}/2$;

— la taille du tournoi de sélection (*tour*). De manière générale on choisit un tournoi binaire, c'est-à-dire opposant deux individus.

A.2.4. Évolution

Lors de cette étape, une population d'enfants est générée à partir de la population de parents (individus sélectionnés lors de l'étape précédente) via des opérateurs génétiques. Deux opérateurs sont utilisés de manière complémentaire, le croisement et la mutation, apparaissant avec une probabilité définie par leurs taux respectifs τ_x et τ_m. Concrètement, l'algorithme réalise *pool* évènements d'évolution. Pour chacun d'entre eux, un tirage au sort permet de définir l'opérateur qui sera utilisé.

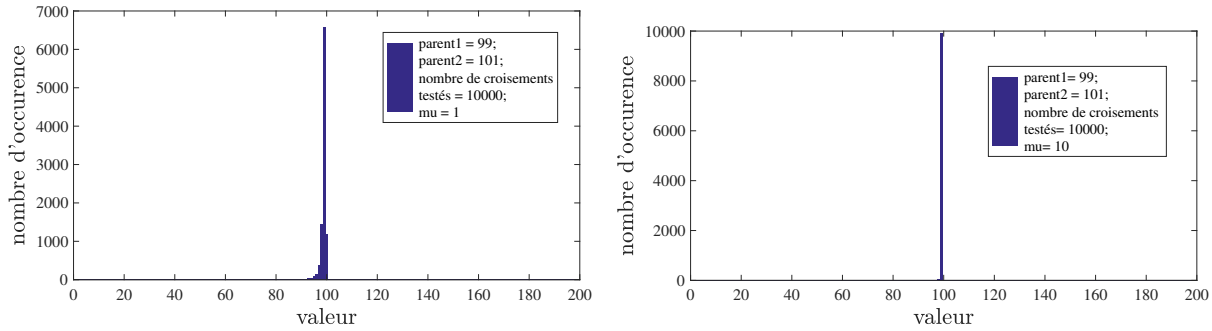
Exemple : $\tau_x = 90\%$ et $\tau_m = 10\%$. Un nombre est tiré au sort en 0 et 1 pour chaque évènement d'évolution. Un croisement sera choisi si le nombre tiré est inférieur ou égal à 0,9 ; sinon ce sera une mutation.

Croisement binaire simulé - Deux parents non-identiques sont tirés au hasard à partir desquels deux enfants vont être générés. Le croisement des caractéristiques entre les individus, basé sur un tirage aléatoire, a plus ou moins de chance d'être important selon la valeur d'un paramètre de réglage de l'algorithme NSGA-II : $mu>0$. Par défaut on utilise $mu=1$.

— Si *mu* est proche de 0 alors la probabilité d'un croisement important entre les parents est élevée ;

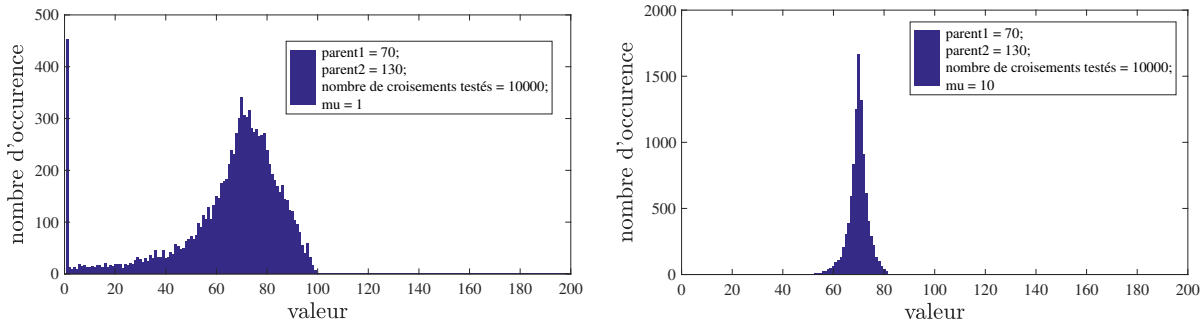
— Si *mu* augmente alors la probabilité d'un croisement important entre les parents est faible.

Exemple : On choisit deux parents possédant une seule composante appartenant à l'intervalle [1 ; 200]. On simule ensuite 10 000 fois le processus de croisement avec différents paramètres. Les résultats, illustrant l'influence du réglage du paramètre mu sont présentés ci-dessous (cf. figure A.3 et A.4).



(a) $mu = 1$. **(b)** $mu = 10$.

FIGURE A.3. Répartition de l'un des deux enfants obtenus lorsque l'on répète 10 000 fois le processus de croisement entre des parents rapprochés ($parent1 = 99$ et $parent2 = 101$) et influence du paramètre mu.



(a) $mu = 1$. **(b)** $mu = 10$.

FIGURE A.4. Répartition de l'un des deux enfants obtenus lorsque l'on répète 10 000 fois le processus de croisement entre des parents éloignés ($parent1 = 70$ et $parent2 = 130$) et influence du paramètre mu. Notons que l'enfant ne peut pas sortir de l'intervalle [1 ; 200].

Mutation polynomiale - Un parent est tiré au hasard à partir duquel un enfant va être généré. La mutation des caractéristiques du parent, basée sur un tirage aléatoire, a plus ou moins de chance d'être importante selon la valeur d'un paramètre de réglage de l'algorithme NSGA-II : mum>0. Par défaut, on utilise $mum = 1$, ce qui augmente la probabilité de subir une forte évolution (par rapport à une valeur supérieure pour mum).

Remarque : Un même parent peut être utilisé à plusieurs reprises pour générer un enfant.

À la fin du processus d'évolution, on obtient une population d'enfants de taille *pool* au minimum (si il n'y a eu que des mutations) à $2 \cdot pool$ au maximum (si il n'y a eu que des croisements). Un tri sur le principe de non-domination est appliqué à la population constituée des enfants et des parents. Les N_{ind} meilleurs individus sont retenus pour former la nouvelle génération.

ANNEXE B

Données du véhicule hybride de référence

Tableau B.1. Caractéristiques du véhicule de référence.

Composants	Notation	Description	Valeur de référence
Moteur thermique	P_{mt}	puissance maximale	54,4 kW@ 4 000 $tr.min^{-1}$
	Ω_{mt}^{max}	vitesse maximale	4 750 $tr.min^{-1}$
	Ω_{ral}	vitesse de ralenti	850 $tr.min^{-1}$
Machine électrique	P_{me}	puissance nominale	30 kW
	Ω_b	vitesse de base	1 250 $tr.min^{-1}$
	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
	u_{max}	tension maximale	191 V
Batterie	N_{bat}	nombre de modules (en série)	28
	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 boîte de vitesses	41/11, 43/21, 37/28, 34/35, 31/41
	η_{bv}	rendement	entre 90 et 98 %
Véhicule	M_v	masse à vide	1 020 kg
	M_{pas}	charge	100 kg
	α_1^{ref} ; α_2^{ref} ; α_3^{ref}	loi de route	85 ; 1.38 ; 0.402

ANNEXE C

Outils pour l'import du modèle RNM sous Matlab

Afin de simuler et d'optimiser la chaîne de traction du véhicule hybride, nous choisissons de travailler sous Matlab. En effet, le modèle de véhicule à notre disposition a historiquement été développé sous Matlab-Simulink [78].

Cependant, comme présenté sur la figure C.1, nous utilisons l'outil de génération de modèles RNM, lui-même intégré à la suite logicielle CADES [79], afin de modéliser la machine électrique. Cet outil est co-développé par la société Vesta System et le G2Elab.

Dans ce contexte, la construction d'un composant logiciel respectant le standard MUSE [80], facilement transportable, est approprié. MUSE (*Modèle Unifié pour les dispositifs et Systèmes Énergétiques*) est une norme permettant l'interopérabilité, la capitalisation et la réutilisation de modèles et d'algorithmes. Cette norme offre par exemple la possibilité de faire communiquer des modèles issus de langages de modélisation tels que Modelica ou VHDL-AMS, avec des outils standards de modélisation et d'analyse tels que Matlab, Flux2D/3D, etc. Cette norme est également compatible avec la norme FMI [81]. Un exemple d'utilisation est présenté dans [82].

La suite logicielle CADES est en fait la première plateforme MUSE native. La figure C.1 présente notre utilisation de celle-ci, depuis la construction du modèle RNM grâce à l'outil dédié (Reluctool), jusqu'à l'utilisation du composant logiciel MUSE sous Matlab. Un plug-in spécifique a été développé à cet usage dans Matlab. Ensuite, l'ensemble des méthodes embarquées dans le composant MUSE sont utilisables lors du processus d'optimisation.

Il faut souligner le travail récent de mise à niveau de la formulation des modèles. Cela a permis de les utiliser avec les outils que nous venons de présenter, dans leur version actuelle. Lors de son stage, Côme Dumont a fait évoluer ces formulations à partir des versions antérieures développées par Vincent Reinbold. On peut lister les évolutions apportées comme suit :

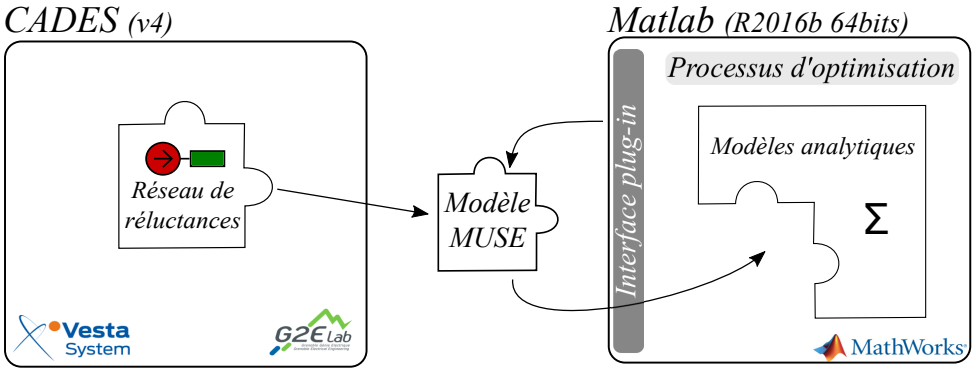


Figure C.1. Implémentation du modèle MUSE. Ce composant logiciel embarque le modèle réluctant de la machine et vient compléter le reste du modèle du véhicule défini sous Matlab.

— l'utilisation de la version 4 de CADES : dans cette dernière, l'outil de conception de RNM est directement intégré à la suite logicielle. La version 2 de Cades et l'outil externe Reluctool étaient utilisés auparavant ;

— l'utilisation de composants logiciels MUSE à la place de l'ancienne norme ICAr, qui avait été définie dans [71] ;

— l'utilisation d'une version plus récente de Matlab (R2016b) en format 64 bits. Cela a demandé le développement d'un plug-in adapté à cette nouvelle utilisation.

ANNEXE D

Validation du calcul des pertes fer

Tableau D.1. Comparaison des pertes fer obtenues dans la machine de référence par différents modèles et pour différents points de fonctionnement. Cela a notamment permis la validation du modèle RNM par le modèle FEM, et garantit des variables d'entrées cohérentes pour le modèle thermiuelque LPTN.

Fonctionnement $\rightarrow$ $\downarrow$ **Modèle**	90 $N \cdot m$ @ 1200 $tr \cdot min^{-1}$	200 $N \cdot m$ @ 1200 $tr \cdot min^{-1}$	30 $N \cdot m$ @ 6000 $tr \cdot min^{-1}$
RNM (Bertotti)	105,3 W	111,1 W	847,6 W
FEM (Bertotti)	102,1 W	103,1 W	864,9 W
FEM (Loss Surface)	133,4 W	143,8 W	1069 W

Liste des figures

1.1 Consommation d'énergie finale selon la source d'énergie, en France (2015) . 21
1.2 Émissions des principaux GES par secteur, en France (2015) 22
1.3 Émissions de polluants atmosphériques par secteur, en France (2015) . . . 23

2.1 Architecture hybride parallèle à deux embrayages 31
2.2 Architecture hybride série 31
2.3 Architecture série/parallèle SPHEV1 31
2.4 Exemple d'architecture à dérivation de puissance 32
2.5 Le VEH dans son environnement 35
2.6 Cycle de conduite Hyzem urbain 35
2.7 Description des approches pour l'optimisation d'un système énergétique . . 38
2.8 Représentation des modèles direct et inverse 43
2.9 Résumé du problème d'optimisation décrit par Vincent Reinbold 45
2.10 Représentation du problème de gestion de l'énergie 48
2.11 Classification des modèles utilisés par Vincent Reinbold 50
2.12 Description des variables géométriques associées à la machine électrique . . 51
2.13 Exemple de cartographie de rendement de la machine électrique 51
2.14 Approche imbriquée développée et utilisée par Vincent Reinbold 52

3.1 Schéma d'une machine synchrone à aimants permanents 57
3.2 Notations et repères pour le fonctionnement de la machine 57
3.3 Caractéristique couple-vitesse type d'une machine synchrone autopilotée . 59
3.4 Représentation de l'anti-périodicité des sources dans la machine 61
3.5 Modèle par réseau réluctant de la machine (un pôle) 62
3.6 Validation du modèle électromagnétique : exemple de la machine de la Toyota Prius II (8 pôles). 63
3.7 Validation du couple pour la machine initiale de la Prius (8 pôles) 63
3.8 Validation du modèle électromagnétique pour une machine à 4 pôles 64
3.9 Validation du modèle électromagnétique pour une machine à 4 pôles 64
3.10 Architecture hybride parallèle à deux embrayages 67
3.11 Cartographie de consommation spécifique du moteur thermique initial . . . 68
3.12 Processus d'optimisation lancé pour chacune des valeurs possibles pour p . 71
3.13 Comparaison des fronts de pareto obtenus pour les différentes valeurs de p 73

3.14 Fonctionnement de la machine électrique sur cycle d'utilisation 75
3.15 Masse des machines électriques obtenues dans des systèmes optimaux . . . 76
3.16 Géométries des machines à 6 et 10 pôles dans un véhicule optimal 77

4.1 Phénomènes de conduction et de convection 82
4.2 Démarche de prise en compte des phénomènes thermiques dans la machine 84
4.3 Interfaces entre composants solides dans une machine synchrone à aimants 86
4.4 Variabilité du coefficient de convection autour des têtes de bobine 87
4.5 Régimes d'écoulement dans l'entrefer 88
4.6 Description de la machine d'un point de vue thermique (plan axial) 89
4.7 Direction principale des enroulements dans la machine 91
4.8 Modélisation et résultats sous Flux3D 94
4.9 Exemple de réseau thermique simple 95
4.10 Représentation équivalente de la conduction (parallélépipède) 96
4.11 Représentation équivalente de la conduction (cylindre) 96
4.12 Représentation équivalente de la convection sur une surface 97
4.13 Zones et flux thermiques dans la machine (plan axial) 97
4.14 Simplification en cellules cylindriques de la machine (coupe axiale) 98
4.15 Modélisation de l'encoche par un réseau de résistances 99
4.16 Modélisation de la tête de bobine dans le plan axial 100
4.17 Réseau de résistances thermiques complet de la machine 102
4.18 Comparaison des modèles FEA et LPTN (profil de température) 103
4.19 Comparaison des modèles FEA et LPTN (flux de chaleur) 103
4.20 Incertitude sur la température des têtes de bobines 112
4.21 Indices de Sobol pour T_{end} et T_{rotor} 115
4.22 Indices de Sobol pour T_{oil} et T_{slot} 115
4.23 Intégration du modèle thermique au processus d'optimisation 117
4.24 Influence de la contrainte thermique sur la cartographie de rendement . . . 118
4.25 Masse des machines dans des systèmes optimaux (avec contrainte thermique) 120
4.26 Fonctionnement de la machine sur cycle (avec contrainte thermique) 121

5.1 Architecture série/parallèle SPHEV1 125
5.2 Architecture série/parallèle *through the road* 125
5.3 Architecture à dérivation de puissance 125
5.4 Distinction entre le modèle simple et le modèle fin de la machine 127
5.5 Fronts de pareto pour les 2 cas d'optimisation de l'architecture SPHEV1 . 128
5.6 Géométrie des machines dans des véhicules SPHEV1 optimaux 129
5.7 Cartographie de rendement des ACM dans des véhicules SPHEV1 optimaux 131

Liste des tableaux

1.1 Les catégories de véhicules embarquant une propulsion électrique 27

2.1 Caractéristiques des principaux composants pour une application VEH . . 32
2.2 Classification non-exhaustive des algorithmes d'optimisation 41
2.3 Modes de fonctionnement de l'architecture hybride parrallèle à 2 embrayages 47

3.1 Réglages de l'algorithme NSGA-II 71
3.2 Comparaison des temps de calcul pour les différents modèles développés et les différents niveaux de calcul lors de l'optimisation 73
3.3 Dimensionnements optimaux de véhicules embarquant 28 modules batteries 75
3.4 Caractéristiques des machines embarquées dans les véhicules optimaux . . 77

4.1 Comparaison des méthodes d'analyse thermique 83
4.2 Contraintes thermiques dans la machine électrique 85
4.3 Données pour la construction du modèle thermique de référence 93
4.4 Équivalence entre certaines grandeurs thermiques et électriques 95
4.5 Points de fonctionnements étudiés pour la validation du modèle LPTN . . 104
4.6 Principaux résultats de la validation sur différents points de fonctionnement 105
4.7 Machines étudiées pour la validation géométrique du modèle LPTN 106
4.8 Principaux résultats de la validation pour différentes géométries 106
4.9 Données sur les paramètres thermiques (incertitude, sensibilité) 108
4.10 Plan d'expériences appliqué au modèle FEA (effet des paramètres) 109
4.11 Plan d'expériences appliqué au modèle FEA (variation de température) . . 110
4.12 Résultats de l'analyse d'incertitude sur les températures dans la machine . 112
4.13 Indices de Sobol pour le modèle LPTN 114
4.14 Dimensionnements optimaux (avec contrainte thermique) 119
4.15 Caractéristiques des machines embarquées dans les véhicules optimaux (avec contrainte thermique) 119

5.1 Cas d'étude pour l'optimisation de l'architecture SPHEV1 126
5.2 Bilan d'énergie des véhicules optimaux SPHEV1 129
5.3 Détails de la géométrie des machines dans des systèmes SPHEV1 optimaux 130