Conception par optimisation d'une chaine de traction électrique et de son contrôle par modélisation multi-physique

Pierre Caillard

▶ **To cite this version:**

Pierre Caillard. Conception par optimisation d'une chaine de traction électrique et de son contrôle par modélisation multi-physique. Autre. Ecole Centrale de Lille, 2015. Français. NNT : 2015ECLI0025 . tel-01284821

HAL Id: tel-01284821

https://theses.hal.science/tel-01284821

Submitted on 8 Mar 2016

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.

N° d'ordre : 282

ECOLE CENTRALE DE LILLE

THESE

présentée en vue
d'obtenir le grade de

DOCTEUR

en

Spécialité : Génie Electrique

par

Pierre CAILLARD

DOCTORAT DELIVRE PAR L'ECOLE CENTRALE DE LILLE

Titre de la thèse :

Conception par optimisation d'une chaine de traction électrique et de son contrôle par modélisation multi-physique

Thèse soutenue le 13 novembre 2015 devant le jury d'examen :

Rapporteur	C. Marchand	Professeur	GEEPS - Univ. Paris-Sud, Gif sur Yvette
Rapporteur	B. Sareni	Professeur	Laplace - ENSEEIHT, Toulouse
Examinateur	E. Semail	Professeur	L2ep - ENSAM, Lille
Examinateur	L. Gerbaud	Professeur	G2ELAB - Univ. Grenoble Alpes, Grenoble
Directeur de thèse	F. Gillon	Maître de conférences, HDR	L2ep - Ecole Centrale de Lille
Co-directeur	M. Hecquet	Professeur	L2ep - Ecole Centrale de Lille
Invité	S-A. Randi	Docteur Ingénieur	Renault, Guyancourt
Invitée	N. Janiaud	Docteur Ingénieur	Renault, Guyancourt

Thèse préparée dans le Laboratoire L2EP à l'Ecole Centrale de Lille
Ecole Doctorale SPI 072 (Lille I, Lille III, Artois, ULCO, UVHC, EC Lille)
PRES Université Lille Nord-de-France

Avant-propos

Ces travaux ont été effectués sous la direction de Frédéric Gillon et Michel Hecquet au sein du laboratoire L2EP sur le site de l'Ecole Centrale de Lille, et sous la direction de Noëlle Janiaud et Sid Ali Randi sur le site de Renault à Guyancourt. Il est difficile de citer toutes les personnes qui ont aidé d'une façon ou d'une autre à la réalisation de cette thèse, aussi je voudrais commencer par remercier en commun tous ceux qui m'ont apporté un soutien technique, administratif ou qui m'ont encouragé.

Je souhaiterais remercier en premier lieu M. Laurent Gerbaud d'avoir accepté de me faire l'honneur de présider le jury. Je remercie également M. Claude Marchand et M. Bruno Sareni pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant d'en être les rapporteurs. Je tiens aussi à remercier M. Eric Semail d'avoir accepté de faire partie du jury et pour son aide précieuse à certains moments-clés de mon parcours.

Je tiens particulièrement à remercier M. Fréderic Gillon pour m'avoir permis d'intégrer l'équipe Optimisation, pour avoir accepté de diriger mes travaux et pour le temps qu'il y a consacré, pour sa disponibilité et sa confiance. Merci également à Michel Hecquet pour son éclairage sur le sujet, ainsi qu'au personnel de l'Ecole Centrale de Lille pour sa disponibilité. Un grand merci à Mme Noëlle Janiaud pour l'initiative de cette collaboration, et son appui énergique, ainsi qu'à Sid Ali Randi pour son intérêt pour le sujet et son encadrement. Je souhaite également remercier Pierre-Hadrien Arnoux, et Mathias Fakam pour leurs enrichissantes contributions, ainsi que tous ceux qui m'ont aidé, Tuan-Vu, Julien, Philippe, Alexandru, Dmitry et bien d'autres.

Enfin, une pensée particulière pour les membres de l'équipe M&S 3EA : Benjamin, Ibrahim, Xavier, Rémi, François, Mehdi, Joe, Zoé, Amin, Hiba, Nadia, Eric, Damien ; et les membres du laboratoire : Mathieu, Nicolas, Martin, Vera, Laurent, Maxime, Patricio, Stéphane, Florent, et tous les autres. Merci pour tous les bons moments.

Table des matières

Avant-propos ... 2
Table des matières ... 3
Table des illustrations ... 7
Liste des tableaux ... 11
Notations et définitions ... 12
Introduction générale ... 17
Chapitre 1 Contexte et objectifs ... 19
1.1 Contexte ... 19
1.1.1 Différents types de motorisations ... 19
1.1.2 Enjeux environnementaux inhérents aux véhicules électriques ... 21
1.1.3 Marché du véhicule électrique en 2014 ... 24
1.1.4 Leviers d'améliorations ... 25
1.2 Description de la chaine étudiée ... 26
1.2.1 Transmission ... 27
1.2.2 Machine électrique ... 29
1.2.3 Onduleur ... 30
1.2.4 Batterie ... 31
1.3 Positionnement du travail ... 32
1.3.1 Processus de conception ... 32
1.3.2 Conception par optimisation ... 33
1.4 Démarche et orientations scientifiques ... 34
1.4.1 Conception optimale selon l'approche système ... 34
1.4.2 Déclinaison du cahier des charges sur le système ... 35
1.4.3 Problématique du temps de calcul en conception ... 36
1.5 Bilan ... 37
Chapitre 2 Modélisation de la chaine de traction ... 39
2.1 Complexité du choix des modèles ... 39
2.1.1 Compromis précision et temps de calcul ... 39
2.1.2 Différentes échelles temporelles ... 42
2.1.2.1 Echelle électronique ... 43
2.1.2.2 Echelle magnétique ... 44

2.1.2.3 Echelle électrique 44
2.1.2.4 Echelle mécanique 46
2.1.3 Orientation du modèle 47
2.1.4 Vocabulaire utilisé 48
2.2 Modèles des composants 49
2.2.1 Modèle du véhicule 51
2.2.1.1 Bloc véhicule 54
2.2.2 Modèle de la transmission 55
2.2.2.1 Bloc transmission 58
2.2.2.2 Masse et cout 58
2.2.2.3 Validation sur la plage vitesse/couple 59
2.2.3 Modèle de la machine électrique 59
2.2.3.1 Modèle thermique 66
2.2.3.2 Contrôle 68
2.2.3.3 Blocs machine 69
2.2.3.4 Masse et cout 71
2.2.3.5 Validation éléments finis 71
2.2.3.6 Validation sur la plage vitesse/couple 72
2.2.4 Modèle de l'onduleur 73
2.2.4.1 Modèle thermique 76
2.2.4.2 Blocs onduleur 76
2.2.4.3 Masse et cout 77
2.2.4.4 Validation sur la plage vitesse/couple 78
2.2.5 Modèle de la batterie 79
2.2.5.1 Variables et contraintes 81
2.2.5.2 Masse et cout 82
2.2.5.3 Validation sur la plage vitesse/couple 83
2.3 Modèle système 84
2.3.1 Assemblage des modèles 84
2.3.2 Simulation de cycles dans différentes conditions 85
2.3.3 Validation sur la plage vitesse/couple 87
2.3.4 Contraintes de performance pour le véhicule 87
2.4 Bilan 88

Chapitre 3 Choix d'une architecture pour l'optimisation 91
3.1 Méthodes et stratégies d'optimisation 92
3.1.1 Classification des problèmes d'optimisation 92
3.1.2 Algorithmes d'optimisation 94
3.1.3 Stratégies d'optimisation 95
3.1.3.1 Surfaces de réponses 95
3.1.3.2 Stratégies multigranularités 97
3.1.3.3 Optimisations multidisciplinaires 98
3.1.4 Robustesse d'une optimisation 99
3.1.5 Bilan des stratégies d'optimisation 100
3.2 Analyse des temps de calcul 101
3.3 Intégration du contrôle de la machine électrique 103
3.3.1 Comparaison des différents contrôles 103
3.3.1.1 V/f constant 104
3.3.1.2 E/f constant 104
3.3.1.3 Optimale 105
3.3.1.4 Comparaison et analyse 105
3.3.2 Cartographie de contrôle 108
3.3.3 Simplification du cycle 111
3.3.4 Biniveau ou mononiveau 113
3.4 Intégration de la thermique 117
3.5 Gestion des bouclages 119
3.5.1 Bouclage sur la thermique machine en régime permanent 119
3.5.2 Bouclage onduleur et batterie 121
3.5.3 Bouclage sur les masses 121
3.6 Prises en compte de contraintes physiques supplémentaires 122
3.6.1 Méthode avec une surface de réponse classique 123
3.6.2 Méthode avec de l'apprentissage automatique 125
3.7 Correction du modèle analytique par Space Mapping 127
3.8 Architecture proposée 129
3.9 Bilan 131
Chapitre 4 Résultats et validations 133
4.1 Cahier des charges, objectifs, variables, contraintes 133

4.1.1 Objectifs 133
4.1.2 Cahier des charges performances 134
4.1.3 Liste des variables considérées 135
4.1.4 Contraintes prises en compte 139
4.2 Analyse de sensibilité 139
4.3 Résultats d'optimisation et analyse 142
4.3.1 Importance de l'optimisation système 142
4.3.1.1 Optimisation composant (O1) 144
4.3.1.2 Optimisation composant avec objectif système (O2) 144
4.3.1.3 Optimisation système (O3) 145
4.3.1.4 Analyse 147
4.3.2 Intégration des variables discrètes 148
4.3.2.1 Algorithme Branch & Bound 148
4.3.2.2 Algorithme NSGA2 149
4.3.2.3 Comparaison 149
4.3.3 Étude complète 153
4.3.3.1 Proposer un ensemble de solutions optimales 153
4.3.3.2 Robustesse des résultats 159
4.3.3.3 Faire un choix 161
4.4 Banc d'essai de la chaine de traction 161
4.4.1 Description du banc 162
4.4.2 Validation modèle machine 163
4.4.3 Validation sur cycle 165
4.5 Bilan 168
Conclusion et perspectives 171
Conclusion générale 171
Perspectives 173
Références bibliographiques 175
Annexes 185
Annexe A 185
Annexe B 186
Annexe C 189

Table des illustrations

Figure 1.1 : Composants de base pour la représentation schématique [MEŞT07] 20
Figure 1.2 : Représentation schématique de 4 possibilités de chaine de traction [MEŞT07] 20
Figure 1.3 : Méthodes de recharge pour les taxis parisiens produits par Krieger, Paris-1898 [GRLA06] 21
Figure 1.4 : Mauvaise qualité de l'air dans certaines agglomérations chinoises 22
Figure 1.5 : Estimations des émissions $C0_2$ équivalent sur un cycle de vie [GBEG13] 23
Figure 1.6 : Flotte mondiale de véhicule électrique à fin 2013 [CHAN14] 24
Figure 1.7 : Ordres de grandeur de cout, masse, volume et puissance pour la batterie [DACS13] 25
Figure 1.8 : Ordres de grandeur de cout, masse, volume, puissance et rendement pour le groupe motopropulseur [DACS13] 26
Figure 1.9 : Illustration du Renault Twizy 26
Figure 1.10 : Configuration de la chaine de traction 27
Figure 1.11 : Différents concepts de réducteurs 28
Figure 1.12 : Analyse comparative des machines électriques [WU12] 29
Figure 1.13 : Utilisation de différents types de transistors en fonction des applications [PARK04] 30
Figure 1.14 : Comparaison des chimies de batterie Li-ion à la cathode [TRDE12] 31
Figure 1.15 : Diagramme de Ragone : puissance en fonction de l'énergie ©Toyota 32
Figure 1.16 : cycle en V utilisé par « Renault » 32
Figure 1.17 : Représentation du modèle comportemental direct et de son modèle inverse associé [REIN14] 33
Figure 1.18 : Modèle de comportement pour résoudre un problème inverse à l'aide d'un algorithme d'optimisation [MEŞT07] 34
Figure 1.19 : Evolution du gain en fonction de l'intégration des composants de la chaine 35
Figure 1.20 : Cycle de roulage WLTC pour véhicule de classe 3 36
Figure 1.21 : Ressenti d'un temps de calcul par un concepteur [GILL09] 36
Figure 2.1 : Front de Pareto des méthodes de modélisation [TRAN09] 40
Figure 2.2 : Exemple d'un modèle numérique d'une machine électrique pour différentes physiques avec les outils Ansys® [ANSY14] 41
Figure 2.3 : Réseau de perméances d'une machine à Réluctance variable à flux axial [CGBR08] 42
Figure 2.4 :Signaux en entrée et en sortie d'un onduleur en fonction de la modélisation liée aux constantes de temps [JANI11] 43
Figure 2.5 : Forme du courant pour le calcul des pertes moyennes ou instantanées d'un onduleur [CANT12] 43
Figure 2.6 : Oscillations de couple autour du couple moyen [JANN10] 44
Figure 2.7 : Réponse à un échelon de courant d'une batterie en fonction du modèle 45
Figure 2.8 : Comparaison d'un modèle de batterie quasi statique « ADV » et d'un modèle dynamique « RC » sur un cycle de roulage [JOPS00] 45
Figure 2.9 : Comparaison de simulations dynamique et quasi-statique [LBLD10] 46
Figure 2.10 : Cycle WLTC, section urbaine « basse » discrétisée à la seconde 46

Figure 2.11 : Formalisme REM appliqué à une chaine de traction électrique [JANI11] 47
Figure 2.12 : Structure retenue pour la chaine de traction 48
Figure 2.13 : Représentation schématique des modèles utilisés pour chaque composant 50
Figure 2.14 : Forces appliquées sur le véhicule [JANI11] 51
Figure 2.15 : Représentation schématique de la transmission entre la machine et les roues 51
Figure 2.16 : Exemple d'un cycle simple 52
Figure 2.17 : Schéma bloc du modèle de véhicule 55
Figure 2.18 : Schéma bloc du modèle de transmission 58
Figure 2.19 : Cartographie de rendement réducteur à $Tred = 70\ °C$ 59
Figure 2.20 : Schéma monophasé équivalent d'une machine asynchrone 60
Figure 2.21 : Ligne de flux moyenne pour le calcul du coefficient de saturation [BESN08] 63
Figure 2.22 : Schéma descriptif du modèle de machine asynchrone 66
Figure 2.23 : Schéma du modèle thermique [KREU08] adapté 67
Figure 2.24 : Exemple de résultat transitoire sur le cycle WLTC moyen 68
Figure 2.25 : Plusieurs tensions/fréquences pour un même point de fonctionnement [CHEN92] 68
Figure 2.26 : Exemple de minimisation des pertes sous contraintes de tension maximum pour un point de fonctionnement 69
Figure 2.27 : Schéma bloc du modèle de machine 70
Figure 2.28 : Schéma bloc du modèle thermique de la machine 70
Figure 2.29 : Cartographie de rendement moteur à $Tmot = 70\ °C$, $SOC = 40\ \%$ et $Tbatt = 20\ °C$72
Figure 2.30 : Exemple de variation de la résistance $RDSON$ avec la température d'une fiche constructeur 74
Figure 2.31 : Schéma bloc du modèle de l'onduleur 77
Figure 2.32 : Schéma bloc du modèle thermique de l'onduleur 77
Figure 2.33 : Cartographie de rendement onduleur à $Tond = 70\ °C$, $SOC = 40\ \%$ et $Tbatt = 20\ °C$ 78
Figure 2.34 : Cartographie d'OCV en fonction du SOC et de la température 80
Figure 2.35 : Cartographie de DCR en décharge 80
Figure 2.36 : Cartographie de DCR en charge 81
Figure 2.37 : Schéma bloc du modèle de batterie 82
Figure 2.38 : Schéma d'un pack batterie de Renault Fluence ZE 82
Figure 2.39 : Cartographie de rendement batterie à $SOC = 40\ \%$ et $Tbatt = 20\ °C$ 84
Figure 2.40 : Schéma de l'assemblage des modèles de la chaine 85
Figure 2.41 : Baisse de l'état de charge batterie sur le cycle WLTC partie « Basse » 85
Figure 2.42 : Cycles comparés 86
Figure 2.43 : Rendement de l'ensemble chaine de traction pour $Ttrans = 70\ °C$, $Tmot = 70\ °C$, $Tond = 70\ °C$, $SOC = 40\ \%$ et $Tbatt = 20\ °C$ 87
Figure 2.44 : Exemple de portion de cycle (2 points) pour la contrainte de performance « grimper une pente de 20 % » 88
Figure 3.1 : Schéma de la conception par optimisation 92
Figure 3.2 : Exemple d'un problème d'optimisation non convexe avec minimum local et global sous contraintes [GILL09] 93
Figure 3.3 : Trois interpolations différentes avec la même fonction et les mêmes points supports [GILL09] 96

Figure 3.4 : Schéma générique d'une stratégie d'optimisation sur surface de réponse [BERB12] 96
Figure 3.5 : Schéma de principe de l'OSM [PIER14] ... 97
Figure 3.6 : Structure de deux stratégies mononiveau [GILL09] ... 98
Figure 3.7 : Décomposition hiérarchique liée à une méthode ATC [GILL09] ... 99
Figure 3.8 : 3 axes pour les stratégies de conception par optimisation ... 100
Figure 3.9 : Représentation 3D des axes de conception par optimisation ... 101
Figure 3.10 : Répartition du temps de calcul en fonction des modèles des composants ... 102
Figure 3.11 : Gestion du défluxage pour le contrôle $E/f=k_2$ ... 105
Figure 3.12 : Cartographie de rendement pour différents contrôles ... 106
Figure 3.13 : Ratio E/f en fonction de la vitesse pour différents contrôles pour un couple=0.25 . 106
Figure 3.14 : Comparaison des rendements en fonction du contrôle ... 107
Figure 3.15 : Écarts de pertes en fonction du contrôle ... 107
Figure 3.16 : Points de fonctionnement superposés à la cartographie d'écart de pertes ... 108
Figure 3.17 : Exemple de quadrillage en vitesse et couple pour obtenir une cartographie de contrôle ... 109
Figure 3.18 : Cartographie de la fréquence optimisée en fonction de la vitesse et du couple ... 109
Figure 3.19 : Front de Pareto de l'erreur sur WLTC Moyen avec une cartographie de contrôle. 110
Figure 3.20 : Exemple de découpage d'un cycle ... 111
Figure 3.21 : Front de Pareto de l'erreur sur le cycle WLTC Moyen par simplification et cartographie ... 112
Figure 3.22 : Comparaison biniveau et mononiveau ... 114
Figure 3.23 : Simplifications de cycle considérées ... 115
Figure 3.24 : Comparaison de la convergence en bi et mononiveau ... 116
Figure 3.25 : Comparaison biniveau et mononiveau sur les valeurs obtenues pour les variables après optimisation ... 117
Figure 3.26 : Simulations thermiques sur un cahier des charges représentatif pour les performances ... 118
Figure 3.27 : Stratégie MDF pour le bouclage thermique ... 119
Figure 3.28 : Évolution des températures avec les itérations pour une température initiale de 70 °C ... 119
Figure 3.29 : Stratégie IDF pour le bouclage thermique ... 120
Figure 3.30 : Bouclages sur le modèle système ... 121
Figure 3.31 : Bouclage sur la masse ... 122
Figure 3.32 : Calculs d'éléments couteux en temps de calcul fait en dehors de l'optimisation système ... 123
Figure 3.33 : Variations de l'oscillation de couple en fonction des encoches rotor et de l'entrefer ... 124
Figure 3.34 : Cartographies du respect de la contrainte d'oscillation de couple ... 124
Figure 3.35 : Déroulement du processus d'intégration d'une contrainte par apprentissage automatique ... 125
Figure 3.36 : Principe d'un arbre de décision ... 126
Figure 3.37 : Cartographies du respect de la contrainte d'oscillation de couple ... 127
Figure 3.38 : Processus d'ajustement du modèle analytique par *space mapping* ... 128
Figure 3.39 : Architecture de l'optimisation analytique système ... 129

Figure 3.40 : Architecture globale du processus d'optimisation 130
Figure 4.1 : Cycle WLTC de Classe 3 pour les véhicules à passagers 134
Figure 4.2 : Représentation du cahier des charges à la roue *pc*=4 et *pp*=3 135
Figure 4.3 : Exemple de relations monotone et non monotone entre deux variables 140
Figure 4.4 : Coefficient de corrélation de Spearman, avec les variables batterie 141
Figure 4.5 : Coefficient de corrélation de Spearman, sans les variables batterie 142
Figure 4.6 : Front de Pareto de la minimisation des pertes machine 144
Figure 4.7 : Comparaison des fronts de Pareto de la minimisation des pertes machine et de la maximisation de l'autonomie 145
Figure 4.8 : Comparaison de fronts de Pareto avec différents jeux de variables 145
Figure 4.9 : Représentation d'une sélection de géométrie du front de Pareto 146
Figure 4.10 : Valeurs des variables le long du front de Pareto système 147
Figure 4.11 : Masse de la chaine de traction le long du front de Pareto système 147
Figure 4.12 : Comparaison des fronts de Pareto avec différents algorithmes 150
Figure 4.13 : Variables le long du front O4 151
Figure 4.14 : Variables le long du front O5 151
Figure 4.15 : Variables le long du front O6 152
Figure 4.16 : Variables le long du front O7 152
Figure 4.17 : Déroulement des optimisations O10 puis O11 154
Figure 4.18 : Comparaison des fronts de Pareto 155
Figure 4.19 : Contraintes des points performances 156
Figure 4.20 : Variables le long du front SQP 157
Figure 4.21 : Variables le long du front NSGA2 158
Figure 4.22 : Simulation des résultats précédents avec cout batterie divisé par 2 159
Figure 4.23 : Simulations des résultats précédents avec $Tbatt = -20\ °C$ 160
Figure 4.24 : Simulation des résultats précédents avec le cycle WLTC « Moyen » 160
Figure 4.25 : Courbes de valorisation kilométrique 161
Figure 4.26 : Schéma de principe du banc 162
Figure 4.27 : Banc d'essai pour cycler 163
Figure 4.28 : Comparaison essais/modèle des rendements pour un couple donné 165
Figure 4.29 : Cycle WLTC « Bas » modifié 166
Figure 4.30 : Cycle de la vitesse moteur sur le banc 166
Figure 4.31 : Cycle du couple moteur sur le banc 167
Figure 4.32 : Comparaison Essai/Modèle sur le cycle WLTC « Bas » 168
Figure 0.1 : cycle WLTC pour les véhicules de classe 3 185
Figure 0.2 : Coefficient SRC sur le cout avec les variables batterie 187
Figure 0.3 : Coefficient SRC sur le cout sans les variables batterie 187
Figure 0.4 : Coefficient SRC sur l'autonomie avec les variables batterie 188
Figure 0.5 : Coefficient SRC sur l'autonomie sans les variables batterie 188
Figure 0.6 : Essai de lâché 189
Figure 0.7 : Mesure des puissances actives 190
Figure 0.8 : Comparaison du rendement moteur entre modèle et essais 190
Figure 0.9 : Comparaison du rendement o entre modèle et essais 191

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Caractéristiques techniques des composants du Twizy 80 27
Tableau 2.1 : Echelles de temps pour les phénomènes physiques..... 42
Tableau 2.2 : Comparaison couple et courant sur 3 points de fonctionnement..... 72
Tableau 2.3 : Comparaison de la consommation dans différentes conditions..... 86
Tableau 2.4 : Résumé des phénomènes modélisés en fonction des composants..... 89
Tableau 3.1 : Comparaison des consommations en fonction du contrôle 108
Tableau 3.2 : Les 6 configurations étudiées 115
Tableau 3.3 : Comparaison des temps de calcul sur les 6 configurations..... 116
Tableau 3.4 : Comparaison MDF/IDF sur le bouclage thermique 120
Tableau 3.5 : Règles pour le classement des points 126
Tableau 4.1 : Liste exhaustive des variables du modèle 136
Tableau 4.2 : Liste des contraintes prises en compte 139
Tableau 4.3 : Problèmes de conception comparés O1 à O3 143
Tableau 4.4 : Variables machine utilisées pour O1, O2 et O3..... 143
Tableau 4.5 : Variables transmission et batterie utilisées pour O3 143
Tableau 4.6 : Paramètres et temps de calcul pour O1 à O3..... 144
Tableau 4.7 : Rappel des résultats d'optimisation en fonction de la simplification du cycle 148
Tableau 4.8 : Variables utilisées pour comparer les algorithmes..... 149
Tableau 4.9 : Problèmes de conception comparés O4 à O7 150
Tableau 4.10 : Paramètres et temps de calcul des configurations O4 à O7..... 150
Tableau 4.11 : Liste des variables pour l'étude complète 153
Tableau 4.12 : Problèmes de conception comparés O8 à O11 154
Tableau 4.13 : Paramètres et temps de calcul des configurations O8 à O11..... 154
Tableau 4.14 : Comparaison des paramètres du schéma équivalent entre modèle et essais 164
Tableau 0.1 : Détails des 4 sections du cycle WLTC 186

Notations et définitions

Acronymes généraux

VE : Véhicule électrique
WLTC : Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle
MOSFET : Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor ou transistor à effet de champ à grille isolée
IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor ou transistor bipolaire à grille isolée
MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion (PWM en anglais).
SiC : Carbure de Silicium
GaN : Nitrure de Galium

Notations véhicule

R_{roue} : rayon de la roue [m]
V_{veh} : vitesse véhicule [m/s]
V_{veh_moyen} : vitesse véhicule moyenne entre 2 points du cycle [m/s]
Ω_{trans} : vitesse des roues et du bloc différentiel [rad/s]
C_{trans} : couple nécessaire au bloc différentiel [Nm]
$F_{aéro}$: force liée à la résistance aérodynamique [N]
F_{pneu} : force liée à la résistance au roulement des pneus [N]
F_{pente} : force liée à la pente de la route [N]
F_{accel} : force liée à la pente de la route [N]
F_{frein} : force pour le léchage des freins [N]
F_{roul} : force pour les roulements des roues [N]
η_{cardan} : rendement des joints de cardan
ρ : masse volumique de l'air extérieur [kg/m^3]
T_{ext} : température de l'air extérieur [°C]
Sf : section frontale du véhicule [m^2]
Cx : coefficient de pénétration dans l'air
CRR : coefficient de résistance au roulement
g : accélération de la pesanteur [m/s^2]
M_{veh} : masse du véhicule [kg]
M_{veh_vide} : masse du véhicule à vide hors chaine de traction [kg]
M_{charge} : charge du véhicule [kg]
M_{trans} : masse de la transmission [kg]
M_{mot} : masse du moteur [kg]
M_{ond} : masse de l'onduleur [kg]
M_{batt} : masse de la batterie [kg]
$\propto$: angle de la pente
p_e : pente moyenne de la route entre 2 points du cycle
R_{roue} : rayon de la roue [m]
γ : accélération du véhicule [m/s^2]

J_{tot}: inerties des pièces tournantes ramenées à la roue [kg.m²]
J_{roue} : inertie d'une roue [kg.m²]
J_{BD} : inertie du bloc différentiel [kg.m²]
J_{AS} : inertie de l'arbre secondaire du réducteur [kg.m²]
J_{AP}: inertie de l'arbre primaire du réducteur [kg.m²]
J_{mot} : inertie du rotor de la machine [kg.m²]
n_{roue} : nombre de roues du véhicule

Notations transmission

Ω_{trans} : vitesse des roues et du bloc différentiel [rad/s]
C_{trans} : couple nécessaire au bloc différentiel [Nm]
$k_{AP/BD}$: rapport de réduction entre arbre primaire et bloc différentiel
$k_{AS/BD}$: rapport de réduction entre arbre secondaire et bloc différentiel
Ω_{mot} : vitesse de rotation de l'arbre moteur [rad/s]
C_{mot} : couple demandé au moteur [Nm]
P_{mot_mec} : puissance mécanique demandée au moteur [W]
$P_{mot_mec_max}$: puissance maximale demandée au réducteur par le cahier des charges [W]
q_{trans} : pertes dans la transmission [W]
$q_{denture}$: pertes dans les dentures [W]
$q_{trainee}$: pertes dans les dentures [W]
nb_{etage} : nombre d'étages de réduction
$nb_{rapport}$: nombre de rapport dans le cas d'une boite de vitesse
p_{AP} : proportion des pertes sur AP
p_{AS} proportion des pertes sur AS
p_{BD} : proportion des pertes sur BD
Tt : température des mesures de pertes par trainée [°C]
T_{trans} : température de l'huile de la transmission [°C]
ν : viscosité cinématique de l'huile [m²/s]
M_{trans} : masse de la transmission [kg]

Notations machine électrique

Ω_{mot} : vitesse de rotation de l'arbre moteur [rad/s]
C_{mot} : couple demandé au moteur [Nm]
V_1 : tension phase neutre efficace [V]
E : force électromotrice efficace [V]
r_1 : résistance statorique d'une phase [Ω]
l_1 : inductance de fuite statorique d'une phase [Ω]
r_2' : résistance rotorique ramenée au stator d'une phase [Ω]
l_2' : inductance de fuite rotorique ramenée au stator d'une phase [Ω]
r_m : résistance pertes fer d'une phase [Ω]
l_m : inductance magnétisante d'une phase [Ω]
s : glissement
I_1 : courant statorique efficace [A]

I_2 : courant efficace dans les barres du rotor [A]
I_{xm} : courant efficace magnétisant [A]
p : nombre de paires de pôles
f : fréquence des courants statoriques [Hz]
C_{em} : couple électromagnétique [Nm]
l_{m0} : inductance magnétisante sans saturation [H]
l_{11} : inductance de fuite encoche stator [H]
l_{12} : inductance de fuite des têtes de bobine [H]
l_{13}: inductance de fuite zig-zag sans saturation [H]
F_g : force magnétomotrice dans l'entrefer [A]
K_c coefficient de Carter
ε: épaisseur de l'entrefer [m]
μ_0 : perméabilité magnétique du vide [T.m/A]
F_i : forces magnétomotrices de l'élément i [A]
H_i : champ magnétique de l'élément i [A/m]
B_i : induction maximum dans l'élément i [T]
f_j : fréquence statorique ou rotorique [Hz]
l_i : longueur moyenne de la ligne de flux de l'élément i [m]
Φ: flux moyen par pole
K_b : coefficient de bobinage
N_{sp} : nombre de spires en série par phase
l_{fer} : longueur de fer [m]
d_g : diamètre moyen de l'entrefer [m]
k_{Fe} : coefficient de foisonnement magnétique du fer
l_{st}: largeur moyenne dent stator [m]
τ_{st} : pas dentaire stator [m]
h_{sy}: épaisseur de la culasse stator [m]
q_{aero} : pertes aérauliques du rotor [W]
q_{roul} : pertes dans les roulements [W]
q_{fer} : pertes fer dans les différentes parties de la machine [W]
q_{sj} : pertes Joules au stator [W]
q_{rj} : pertes Joules au rotor [W]
q_{add} : pertes additionnelles [W]
k_{add} : proportion de pertes additionnelles
n_{ph} : nombre de phases
T_{cu} : température du bobinage en cuivre [°C]
T_{alu} : température de la cage en aluminium [°C]
T_g: température de l'entrefer [°C]
T_{mot} : ensemble des températures de la machine [°C]
$T_{amb_mot_ext}$: température du fluide de refroidissement coté carter [°C]
$T_{amb_mot_int}$: température du fluide de refroidissement coté arbre [°C]
R_{xy} : résistance thermique de l'élément xy [K/W]
C_i: capacité thermique de l'élément i [J/K]

h_{mot} : coefficient de convection thermique [W/(m².K)]
ρ_g : masse volumique de l'air de l'entrefer [kg/m3]
r_{r_ext} : rayon extérieur du rotor [m]
L_{rot} : longueur du rotor [m]
K_{sa}: coefficient de saillance
C_f : coefficient de frottement
U_{mot} : tension efficace phase neutre [V]
I_{mot} : courant efficace [V]
U_{mot_max} : tension efficace maximale disponible à la machine [V]
$\mathrm{M_{mot}}$: masse de la machine [kg]
V_i : volume du matériau *i* [m³]
ρ_i : masse volumique du matériau *i* [m³/kg]
M_i : masse du matériau *i* [kg]
$cout_i$: cout massique du matériau *i* [€/kg]

Notations onduleur

I_{batt} : courant batterie [A]
U_{batt} : tension batterie [V]
U_{mot_max} : tension efficace maximale disponible à la machine [V]
q_{ond} : pertes dans l'onduleur [W]
P_{aux} : puissance absorbée par les auxiliaires [W]
$\eta_{DC/DC}$: rendement du convertisseur DC/DC
r_{mod} : rapport de modulation
$\mathrm{I_T}$: courant efficace qui traverse le MOSFET à l'état passant [A]
R_{DSON} : résistance interne du transistor MOSFET en conduction [Ω]
f_{mod} : facteur de modulation
n_{MOS}: nombre de MOSFET en parallèle dans chaque branche
β : un coefficient égal à 1.5 pour les MOSFET
R_{DSON_ref} : résistance interne du transistor MOSFET en conduction [Ω]
T_{j_ref} : température de jonction à laquelle a été relevé R_{DSON_ref} [K]
T_j : température de jonction [K]
T_{ond} : température de jonction = T_j [K]
T_{amb_ond} : température du fluide de refroidissement [°C]
U_{D0} : tension à courant nul à l'état passant [V]
I_{Dm} : courant moyen qui traverse la diode [A]
R_D : résistance de la diode [Ω]
I_D : courant efficace qui traverse une diode [A]
f_{com} : fréquence de commutation [Hz]
Tc_{ON} temps que met le transistor à se fermer [s]
Tc_{OFF}: temps que met le transistor à s'ouvrir [s]
Q_{rr} : énergie de recouvrement de la diode [C]
q_{ond} : pertes dans l'onduleur [W]
q_{com}^{D} : pertes par commutation dans une diode [W]

q_{com}^{T}: pertes par commutation dans un MOSFET [W]
q_{cond}^{D} : pertes par conduction dans une diode [W]
q_{cond}^{T} : pertes par conduction dans un MOSFET [W]
R_{THJ}: résistance thermique de la jonction du composant [K/W]
R_{THP}: résistance thermique du PCB (Printed Circuit Board) [K/W]
R_{THR}: résistance thermique du dissipateur [K/W]
M_{ond} : masse onduleur [kg]
P_{ond_max} : puissance maximum demandée à l'onduleur par le cahier des charges [W]

Notations batterie

T_{batt} : température batterie [°C]
I_{batt} : courant batterie [A]
C_{cell} : capacité nominale d'une cellule [Ah]
Δt : durée du point de fonctionnement considéré [h]
SOC : état de charge (State Of Charge)
OCV : tension circuit ouvert (Open Circuit Voltage) [V]
DCR : chute de tension sous un courant donné (Direct Current Resistance) [Ω]
ns : nombre de cellules en série
np : nombre de cellules en parallèle
R_{cable} : résistance dans les câblages entre la batterie et l'onduleur [Ω]
q_{batt} : pertes de la batterie [W]
M_{batt} : masse du pack complet [kg]
M_{cell} : masse d'une cellule batterie [kg]
$prix_{kwh}$: cout des cellules par kwh [€]
η_{batt} : rendement batterie

Notations architecture d'optimisation

SQP : Sequential Quadratic Programming
RBF : Radial Basis Function
NSGA2 : multi-objectives Non dominated Sorting Genetic Algorithm
B&B: Branch & Bound
MDF : MultiDisciplinary Feasible
IDF : Individual Discipline Feasible
AAO : All-At-Once
BLISS : Bi-Level Integrated System Synthesis
CO : Collaborative Optimization
ATC : Analytical Target Cascading
pc : nombre de points pour la simplification du cycle
pp : nombre de points pour le cahier des charges performances
H : entropie en tant que mesure du désordre
SRC : Standardized Regression Coefficient
ρ_S: coefficient de corrélation de Spearman

Introduction générale

Le secteur des transports est soumis à des problématiques environnementales fortes, de plus en plus étudiées et quantifiées, notamment ses impacts sur la qualité de l'air et le réchauffement climatique, avec des conséquences sociétales et géopolitiques non négligeables. Dans ce contexte, la propulsion électrique offre une solution sans émission à l'usage, avec l'opportunité d'être alimentée par une énergie électrique qui devient renouvelable et permet une production locale. Ce véhicule électrique, solution « idéale », est pourtant présent depuis les débuts de l'automobile. Toutefois, il souffre de limites principalement liées à l'autonomie et au cout de fabrication en comparaison avec des solutions thermiques. Depuis les années 2010, un nouvel élan, cette fois durable, est apporté à la mobilité électrique par le développement des batteries Li-ion, avec des perspectives d'autonomie entre 300 km et 500 km en fonction des véhicules dès 2017, et un cout en baisse continue de plus en plus proche du véhicule à combustion dont le durcissement des normes antipollution engendre des couts d'achat et d'entretien supplémentaires.

La chaine de traction qui propulse ces véhicules est un levier majeur d'amélioration, aussi bien au niveau du cout que de l'autonomie. Dans le cadre de ce travail de recherche, nous nous concentrerons sur la phase de conception amont de la chaine de traction, étape qui permet un pré dimensionnement des organes en faisant des choix importants sur ses composants : transmission, machine électrique, électronique de puissance et batterie. Ces composants forment un système à part entière avec leurs interactions respectives. La conception de ces composants séparément ne garantit pas qu'une fois assemblés, ils formeront une chaine de traction performante pour nos critères. De ce constat se dégagent des problématiques qui seront le point de départ de notre travail : comment concevoir une chaine de traction électrique d'un point de vue système, c'est-à-dire en travaillant directement sur l'autonomie du véhicule plutôt que sur les pertes des organes séparément ? L'enjeu est donc de pouvoir intégrer les interactions entre les composants, les lois de contrôle inhérentes à certains organes ou encore les contraintes physiques de chaque composant. Comment intégrer l'ensemble de ces éléments dans le cadre d'une optimisation qui permettra d'établir les meilleurs compromis en termes de cout et d'autonomie ?

Afin de présenter le travail réalisé, ce manuscrit sera articulé en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre introductif, nous présenterons le contexte du véhicule électrique et les différentes problématiques de sa conception en phase amont du développement : prise en compte des interactions entre composants à l'échelle système en partant d'un cahier des charges au niveau véhicule, intégration des contraintes propres à chaque composant relevant de différentes physiques,

et méthodologies pour la gestion du temps de calcul en conception par optimisation afin de permettre l'exploitation des modèles développés.

Dans le second chapitre, nous étudierons les différents choix possibles de modèles pour les composants de la chaine de traction électrique. La granularité des modèles, les échelles temporelles ainsi que la causalité seront abordées. Puis, les modèles sélectionnés pour chaque composant seront explicités, avec le détail des entrées/sorties. L'assemblage de ces modèles donnera le modèle système qui nous permettra de simuler des cycles de roulage dans différentes conditions pour voir l'influence de certains paramètres.

Dans le troisième chapitre, un état de l'art des algorithmes, méthodes et stratégies d'optimisation sera effectué. Le travail se concentrera sur l'étude et la comparaison de différentes stratégies permettant d'intégrer le cycle de roulage, le contrôle de la machine électrique et sa thermique ainsi que l'exploitation d'un modèle éléments finis dans le processus d'optimisation. L'impact de ces stratégies sur le temps de calcul sera détaillé.

Nous présenterons des résultats d'optimisation sur différents jeux de variables et algorithmes dans le dernier chapitre. L'analyse des résultats fera ressortir la pertinence d'une optimisation système et permettra d'établir comment résoudre efficacement notre problème complexe avec des temps de calcul compatibles avec les besoins. Enfin nous présenterons des validations expérimentales effectuées sur banc d'essai avec la machine et l'onduleur du Renault Twizy. Ces résultats permettront de valider le modèle et les hypothèses faites.

Chapitre 1 Contexte et objectifs

Ce chapitre présente le contexte social et environnemental d'un véhicule à chaine de traction électrique et les améliorations qui permettront une plus grande diffusion de ce type de véhicule. Puis les composants du véhicule étudié seront décrits, par comparaison avec d'autres technologies existantes. Enfin, la démarche et les enjeux scientifiques seront détaillés dans ce chapitre introductif.

1.1 Contexte

Dans un contexte de forte urbanisation, l'impact environnemental des véhicules utilisés pour répondre au besoin de transport individuel ou collectif est un enjeu sociétal important. Plusieurs types de motorisations sont utilisés et sont d'une certaine façon concurrents.

1.1.1 Différents types de motorisations

Plusieurs types de chaines de traction ont été développés pour motoriser les véhicules. Ce paragraphe décrit 4 possibilités :

- Véhicule à combustion interne ;
- Véhicule hybride ;
- Véhicule hybride rechargeable, ou « plug-in » ;
- Véhicule électrique (VE).

L'objectif principal de l'hybridation par rapport à un véhicule thermique est d'abaisser la consommation de carburant et de réduire les émissions de CO_2. Différents concepts de véhicules hybrides et électriques existent [EHGE10], avec parfois des éléments de stockage d'énergie moins classiques que la batterie comme les volants d'inertie, les supercondensateurs ou l'hydrogène pour alimenter une pile à combustible. Une représentation schématique a été mise en place dans [MEŞT07] pour comparer les différentes structures, à partir d'une liste de composants de base (Figure 1.1). Les exemples de la Figure 1.2 sont des cas particuliers pour illustrer ces différences.

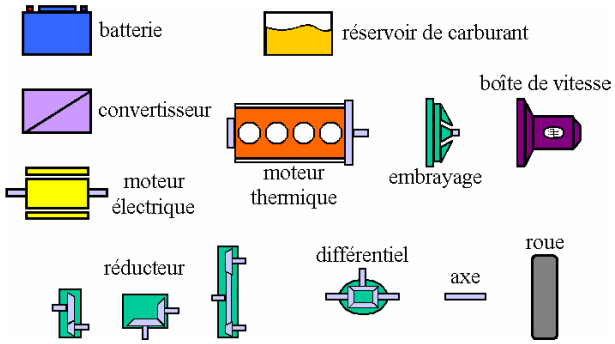
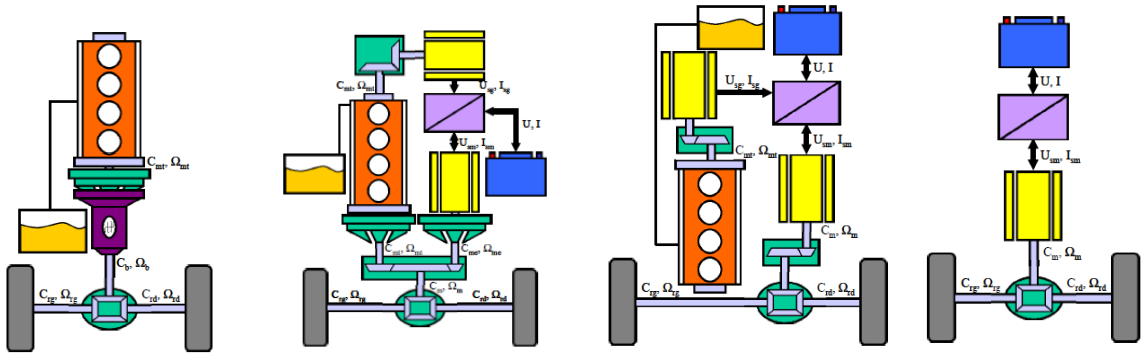


Figure 1.1 : Composants de base pour la représentation schématique [MEŞT07]



a) Combustion interne

b) Hybride "série-parallèle", éventuellement rechargeable

c) Hybride "série", généralement rechargeable

d) Eléctrique à batterie

Figure 1.2 : Représentation schématique de 4 possibilités de chaine de traction [MEŞT07]

La motorisation à combustion interne Figure 1.2 (a) est centrée autour d'un moteur thermique alimenté en combustible par un réservoir de carburant. L'hybridation Figure 1.2 (b), utilisée par Toyota sur sa Prius [EHGE10], ajoute une génératrice et un moteur électrique. Les moteurs thermique et électrique peuvent propulser simultanément le véhicule. Cette chaine de traction peut devenir rechargeable lorsque le véhicule peut être connecté sur le réseau pour recharger les batteries, qui permettront de parcourir plusieurs dizaines de kilomètres en roulage électrique. L'hybridation Figure 1.2 (c) est généralement le cas d'un véhicule électrique à prolongateur d'autonomie comme la BMW i3, ou seul le moteur électrique peut propulser les roues. Le moteur thermique sert alors uniquement à recharger les batteries par l'intermédiaire d'une génératrice. Enfin la motorisation électrique Figure 1.2 (d) n'a qu'un moteur électrique alimenté par des batteries comme la Renault Zoé ou la Nissan Leaf, permettant de parcourir en général plus d'une centaine de kilomètres. Notre travail va se concentrer exclusivement sur la chaine de traction tout électrique.

Elle comprend dans le cas où l'on a une seule machine électrique de traction :

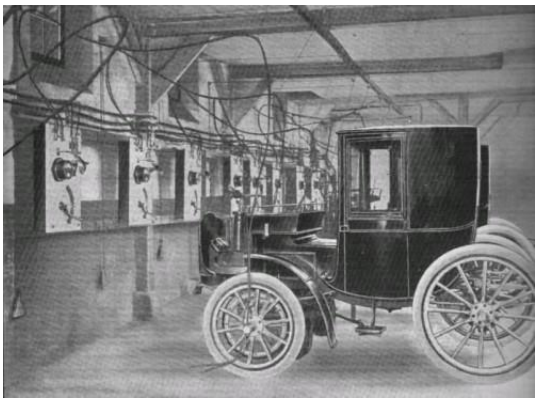
- Une transmission, à un ou plusieurs rapports de réduction pour différencier la vitesse des roues et celle de la machine électrique. On parle de réducteur lorsqu'il n'y a qu'un rapport, et de boite de vitesses lorsqu'il y a plusieurs rapports. La transmission intègre également un différentiel permettant d'adapter la vitesse des roues en virage ;

- Une machine électrique de traction, pour transformer l'énergie électrique en énergie mécanique permettant le déplacement du véhicule. Pour des raisons de maintenance et de fiabilité due à l'utilisation de balais, les machines à courant alternatif dites *brushless* sont préférées aux machines à courant continu ;
- Un onduleur permettant de convertir le courant continu des batteries en courant alternatif pour la machine. Si l'on souhaite récupérer l'énergie au freinage, l'onduleur doit également être réversible en courant. Il contrôle le couple de la machine électrique.

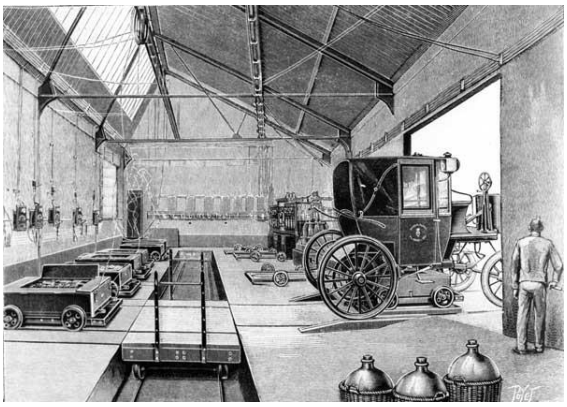
La batterie de traction est souvent dissociée du terme « chaine de traction électrique », en anglais « electric powertrain » ou « electric drive system ». Toutefois, dans la suite de ce document, la batterie sera incluse dans cette dénomination. Elle est généralement à base de lithium pour les VE [TRDE12], pour stocker l'énergie électrique sous forme chimique.

1.1.2 Enjeux environnementaux inhérents aux véhicules électriques

Le véhicule électrique a connu son essor au début du 19ème siècle avant même le véhicule à combustion interne [GRLA06]. A cette époque, la majorité des taxis parisiens étaient électriques et se rechargeaient via une infrastructure dédiée : bornes de recharge publiques ou station d'échanges de batteries (Figure 1.3). L'autonomie de ces véhicules était entre 50 et 80 km avec des vitesses de déplacement inférieures à 40 km/h.



a) Bornes de recharge



b) Station d'échange de batteries

Figure 1.3 : Méthodes de recharge pour les taxis parisiens produits par Krieger, Paris-1898 [GRLA06]

Le véhicule à combustion interne s'imposa par la suite grâce à son cout plus faible et à une production en grande série. Entre 1900 et 2008, les véhicules électriques produits n'ont jamais atteint le stade de la grande série. Dans les années 1990, la Peugeot 106 électrique a été produite à 6400 exemplaires, la Chevrolet EV1 à 1100 exemplaires et la Renault Elektro-Clio à 400 exemplaires. Ces chiffres sont à comparer aux 2.8 millions d'exemplaires de la Peugeot 106 thermique. Depuis les années 2000, les progrès sur les batteries Lithium-ion permettent d'envisager à nouveau le VE comme une solution pertinente de mobilité. Maintenant, les VE atteignent des autonomies de l'ordre de 150 km hors véhicules de luxe (~400 km d'autonomie pour la Tesla S avec une vitesse de pointe de 250 km/h et le 0 à 100 km/h en 2.8 s).

Face au véhicule à combustion, le véhicule électrique dit « zéro émission » à l'usage, offre certaines réponses à la problématique de forte urbanisation et d'augmentation de la population [CHAN02]:

- **La qualité de l'air** est fortement dégradée par le transport routier avec un impact sur la qualité de vie et la santé [TEDE10]. Les émissions de particules fines sont la cause principale de la détérioration de l'air [CAAP14]. Ces émissions peuvent venir de la combustion, mais également des plaquettes de frein [THHA08]. La pollution par le freinage est fortement limitée sur un VE grâce au freinage électrique permettant de plus une récupération d'énergie. Les années 2013 et 2014 ont vu se multiplier les pics de pollutions en Chine [JLWZ14] avec l'augmentation du trafic routier (Figure 1.4).

a) Janvier 2013, record de pollution à Pékin, Chine © M.TAMURA / AP / SIPA

b) Avril 2014 : vente d'air « des montagnes » à Zhengzhou, Chine © cfp.cn

Figure 1.4 : Mauvaise qualité de l'air dans certaines agglomérations chinoises

Les piétons portent régulièrement des masques de protection et certaines entreprises vont jusqu'à proposer la vente d'air importée des montagnes. En France et en Europe, l'impact sur les problèmes de santé et ses répercussions économiques est étudié avec attention [FBLD07][SATT15][AÏCH15] ;

- **La pollution sonore** due au transport routier est une des principales nuisances en France [BPDJ10]. Le VE permet de réduire significativement cette nuisance pour les vitesses urbaines, de l'ordre de 5dB à 20km/h pour une voiture citadine, et bien plus pour des véhicules deux roues comme un scooter ou une moto [PBKM14] ;

- **L'impact environnemental** se mesure au travers d'une analyse du cycle de vie « du berceau à la tombe », qui permet d'obtenir des indicateurs dans différentes catégories telles que l'épuisement des ressources, l'impact sur la santé humaine, les changements climatiques ou encore l'acidification des sols ou des océans. L'étude présentée dans [GBEG13] (Figure 1.5) compare le véhicule à combustion interne (ICEV), l'hybride (HEV), l'hybride rechargeable (PHEV) et l'électrique (BEV), sur une base de 150 000km parcourus pendant la vie du véhicule.

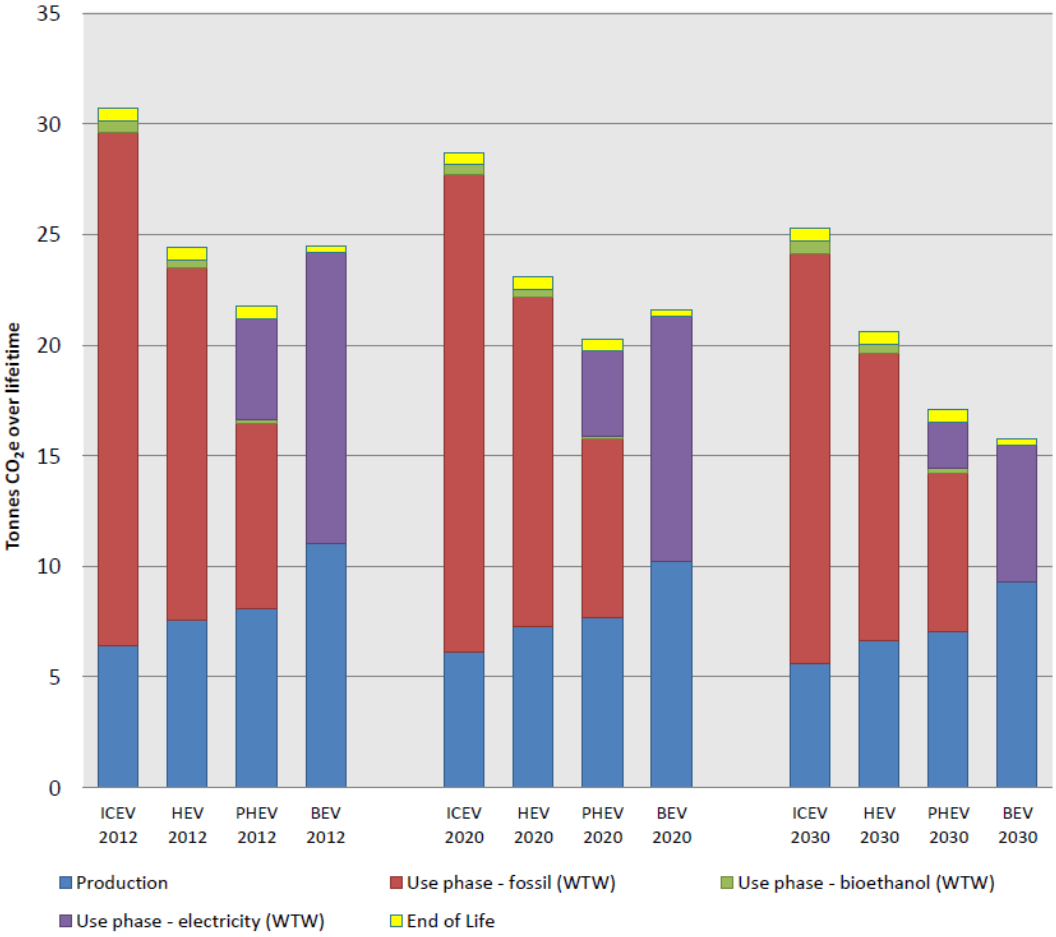


Figure 1.5 : Estimations des émissions $C0_2$ équivalent sur un cycle de vie [GBEG13]

L'étude prend en compte la moyenne des émissions provenant de la production d'électricité en Europe. L'indicateur utilisé est le $C0_2$ équivalent qui pondère le potentiel de réchauffement climatique des différents gaz produits au cours de la vie des véhicules. En définitive, les écarts sont assez faibles entre HEV, PHEV et BEV, à l'avantage du BEV à long terme grâce à une production d'électricité de plus en plus propre et des batteries à la durée de vie augmentée. Ce type d'étude est fortement dépendant des hypothèses de kilométrages, durée de vie des batteries et production d'électricité impactant la phase de roulage et la phase de fabrication des batteries [EMSS13]. Néanmoins d'autres études arrivent à des résultats similaires [HSMS12][HJHH11] ;

- **L'épuisement des réserves naturelles** est une contrainte forte pour le changement et l'évolution des technologies. Les réserves de pétrole sont limitées. Les réserves de lithium, le matériau principal des batteries actuelles, ne semblent pas limitantes à moyen/long terme [GRME10] ;

- On peut voir également les VE comme une opportunité pour les **réseaux électriques intelligents** [EHFL12] ou « smartgrid ». La présence de batteries connectées au réseau laisse envisager de nouvelles fonctionnalités comme lisser les pics de production d'électricité, éviter

les coupures, ou encore pallier l'intermittence de la production d'électricité des énergies renouvelables telles que l'éolien ou le solaire [KETO05]. Les batteries n'ayant plus assez de capacité pour une utilisation automobile peuvent également être utilisées en seconde vie comme stockage stationnaire, avec un intérêt économique [HWYF14] et environnemental [AYFY14]. Ces possibilités de stockage d'électricité permettent d'abaisser l'impact environnemental de la production d'électricité.

De nombreux pays soutiennent le développement du VE au travers de subventions : aides à l'achat ou à l'installation de bornes, péages urbains, utilisation des couloirs de bus, places de parking dédiées, etc [ZXRL14]. En Europe, en plus des normes limitant les émissions des véhicules neufs « EURO » (EURO 6 en 2014), la moyenne d'émissions de C02 des constructeurs est soumise au « Corporate Average Fuel Economy » (CAFE), avec un objectif ambitieux de 95 gC02/km en 2020 qui implique une électrification des gammes de véhicules sous peine de pénalités financières.

1.1.3 Marché du véhicule électrique en 2014

En parallèle de l'évolution des normes, le nombre de modèles de VE de grande ou moyenne série augmente régulièrement depuis 2010, avec une croissance des ventes plus rapide que celle de l'hybride en 1999 [BLHA14]. Courant 2014, la flotte de véhicules électriques mondiale est estimée à environ 500 000 unités [CHAN14], avec des taux de pénétration qui varient beaucoup d'un pays à l'autre. La Figure 1.6 présente le taux de pénétration des véhicules électriques pour certains pays. La Norvège a le plus grand nombre de VE par habitant. L'alliance Renault-Nissan a annoncé avoir vendu 200 000 véhicules électriques en 2014.

Country	PEV fleet (Cum sales or registrations)	Population as of December 2013	PEV market penetration per 1,000 people (Dec 2013)	PEV market share of total new car sales in 2013	Comments
United States	172,000	320,050,716	0.53	0.62%	(a)
Japan	74,124	127,143,577	0.58	0.85%	(b)
China	38,592	1,385,566,537	0.03	0.08%	(c)
Netherlands	28,673	16,759,229	1.71	5.37%	(d)
France	28,560	64,291,280	0.44	0.65%	(e)
Norway	20,486	5,042,671	4.04	5.60%	(f)

Note: Plug-in electric vehicle fleets include only highway-capable vehicles except where noted in comments. French and Norwegian registrations do not include plug-in hybrids.

Comments: **(a)** Sales between 2008 and December 2013. Includes only plug-in electric passenger cars. **(b)** Sales since July 2009 through December 2013. Kei cars not included for market share estimate. Includes plug-in electric cars and all-electric utility vans. **(c)** New energy vehicle sales between 2011 and 2013. Includes a significant number of all-electric buses. **(d)** Registrations between 2009 and December 2013.Includes plug-in cars and all-electric commercial vans. **(e)** Registrations between 2010 and December 2013. Includes only all-electric cars and 11,304 utility vans. Market share is 0.49% if only all-electric cars are considered. **(f)** Registrations between 2003 and December 2013. Includes only all-electric cars, vans and over 1,500 heavy quadricycles.

Figure 1.6 : Flotte mondiale de véhicule électrique à fin 2013 [CHAN14]

Le développement du VE est malgré tout bridé par une autonomie plus faible, un temps de chargement long, et un cout de fabrication plus élevé, comparé à un véhicule thermique équivalent : en 2014, un véhicule électrique type Renault Zoé, Nissan Leaf ou Volkswagen e-Golf a une autonomie entre 100 et 150 km avec une batterie d'environ 24 kWh pour un temps de charge de 30 minutes minimum. Une utilisation pour des trajets dépassant l'autonomie du véhicule est donc plus contraignante.

1.1.4 Leviers d'améliorations

De nombreux leviers permettent de résoudre les verrous liés aux VE. L'autonomie peut être améliorée par exemple par :

- La réduction de la résistance à l'avancement par l'aérodynamique ou le frottement des pneus ;
- La diminution de la masse ;
- L'augmentation de l'énergie électrique embarquée ;
- L'amélioration des rendements de la chaine de traction ;
- La réduction de la consommation sur un trajet par une adaptation de la conduite.

L'abaissement du cout global peut se faire sur les volets matières premières, processus de fabrication et couts de développements. Des ordres de grandeur ont été établis aux Etats-Unis par le département de l'énergie sur les couts en 2012 des batteries et groupe motopropulseur électrique ainsi que des objectifs à atteindre pour ramener ces couts à ceux d'un véhicule à combustion [DACS13] (Figure 1.7 et Figure 1.8)

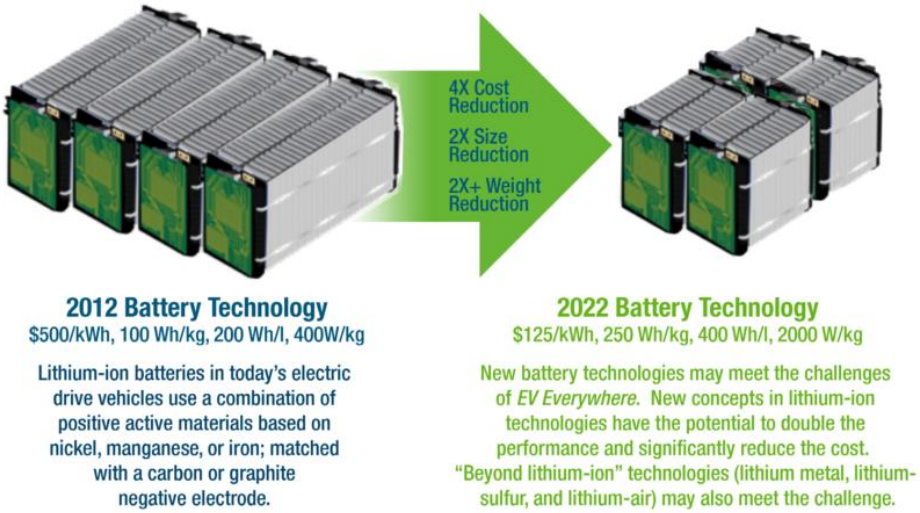


Figure 1.7 : Ordres de grandeur de cout, masse, volume et puissance pour la batterie [DACS13]

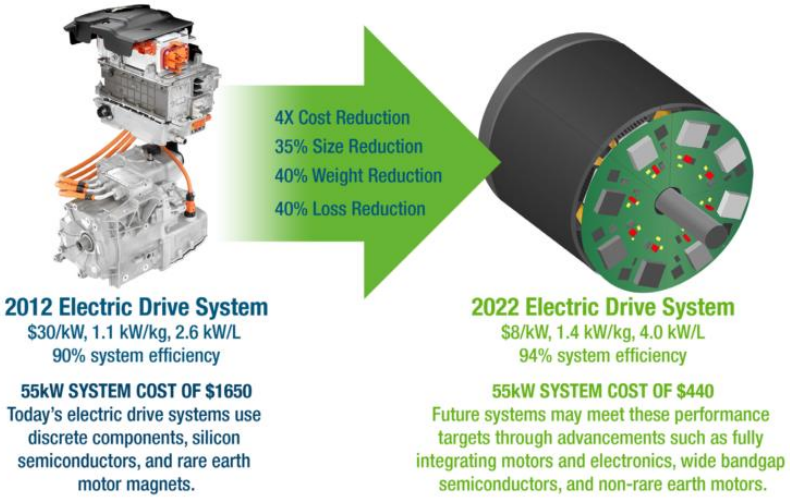


Figure 1.8 : Ordres de grandeur de cout, masse, volume, puissance et rendement pour le groupe motopropulseur [DACS13]

Les ordres de grandeur indiqués pour 2012 sont cohérents avec la gamme de véhicules électriques Renault lancés entre 2011 et 2013 : Twizy, Zoé, Fluence et Kangoo. Les réductions de cout, masse et volume envisagées sont ambitieuses avec des facteurs jusqu'à 4 sur les couts. Le travail sur la chaine de traction électrique est ainsi un levier de développement majeur permettant d'améliorer entre autres les rendements, la masse et le cout du système. Pour cela la phase de développement et conception est primordiale, et les outils de conception assistée par ordinateur sont d'une aide précieuse. C'est dans ce cadre que notre démarche s'inscrit.

1.2 Description de la chaine étudiée

La chaine de traction utilisée comme référence pour ce travail est celle du Renault Twizy. La Figure 1.9 (a) présente le véhicule actuellement en vente. La Figure 1.9 (b) énonce les principaux éléments de la chaine de traction tout électrique de ce véhicule léger.

a) Renault Twizy b) Chaine de traction du Twizy

Figure 1.9 : Illustration du Renault Twizy

Ce véhicule existe en 2 configurations, une version « 45 » sans permis limitée à 45 km/h et une version « 80 » avec permis B qui permet d'atteindre 80 km/h. Comme la plupart des véhicules électriques disponibles sur le marché en 2014, le Twizy possède un seul moteur et un réducteur avec rapport de réduction unique. La configuration est celle de la Figure 1.10 : batterie, onduleur, machine, réducteur, différentiel, joints de cardan et roues.

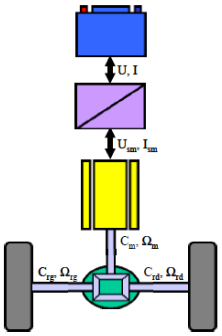


Figure 1.10 : Configuration de la chaine de traction

Les caractéristiques de la version 80 sont décrites dans le tableau 2.1:

Tableau 1.1 : Caractéristiques techniques des composants du Twizy 80

Moteur	Type	Machine asynchrone à cage d'écureuil
	Puissance maximale	13 kW
	Couple maximal	57 Nm de 0 à 2100 tr/min
Batterie	Type de batterie	li-ion
	Tension nominale batterie	52 V
	Capacité	6.1 kWh
	Masse	100 kg
Onduleur	Type	MOSFET
	Courant max	450 A
Véhicule	Vitesse maximale	80 km/h
	Accélération de 0 à 45 km/h	6.1 s
	Autonomie (cycle ECE)	100 km
	Masse (batterie comprise)	473 kg

Les paragraphes suivants décrivent les structures possibles pour les composants de la chaine de traction sans rentrer dans le détail de leur modélisation.

1.2.1 Transmission

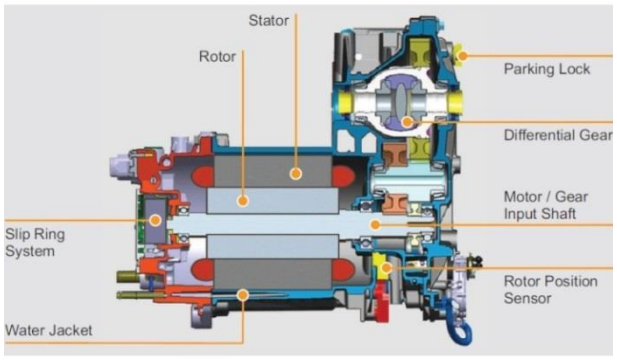
La transmission d'un véhicule électrique est généralement composée d'un réducteur mono-rapport intégrant un différentiel mécanique. L'intérêt de ce réducteur est de pouvoir différencier la vitesse des roues avec celle du moteur pour avoir un moteur qui tourne plus vite, et donc avec moins de couple, qui permettra d'avoir un moteur plus compact.

Des travaux sont encore en cours pour étudier l'influence d'utiliser une boite de vitesse multi-rapports [RECM10][ZZWZ13] afin d'améliorer le rendement et/ou les performances du véhicule. Les gains dépendent de l'étendue de la plage de meilleur rendement du moteur, et du cycle considéré.

L'ordre de grandeur est un gain de 2 à 5 % sur la consommation avec 2 rapports plutôt qu'un seul [RECM10][ZZWZ13]. Ce gain est généralement insuffisant par rapport au surcout engendré par la boite de vitesse, mais une augmentation de la vitesse maximale des véhicules (de en passant de 140km/h pour la Renault Zoé actuelle à 200 km/h par exemple) peut justifier l'emploi d'une boite de vitesse.

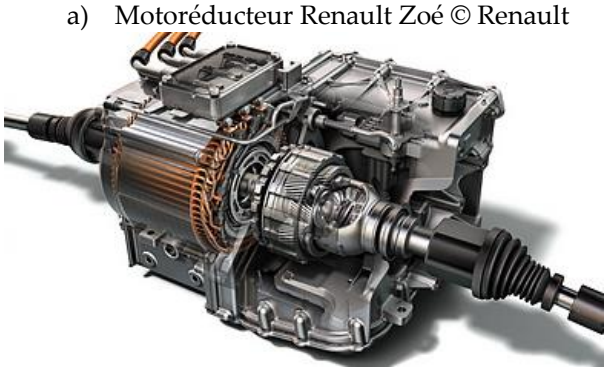
Dans le cas d'un réducteur avec un rapport unique, plusieurs implantations permettent de réaliser la fonction. Un étage de réduction est généralement limité à un rapport de réduction de 5 environ. La Figure 1.11 présente 4 possibilités :

- **Réducteur offset (a),** souvent avec 2 étages de réduction et un rapport de réduction proche de 10, comme sur le Twizy. C'est la solution la plus courante, car elle reprend l'implantation classique d'une boite de vitesse de véhicule thermique ;
- **Réducteur coaxial offset (b)**, avec nécessairement 2 étages de réduction et l'arbre d'une roue qui traverse le rotor de la machine. Cette solution offre plus de compacité ;
- **Réducteur coaxial épicycloïdal (c),** plus compact que (a) également. Il faudrait mettre deux trains épicycloïdaux l'un après l'autre pour avoir l'équivalent de 2 étages de réduction ;
- **Réducteur coaxial magnétique**, intégré au rotor (d droit) ou non (d gauche), la fonction de réduction de la vitesse est réalisée grâce à des rotors à base d'aimants. Cette solution est étudiée dans la littérature, mais non commercialisée sur véhicule.

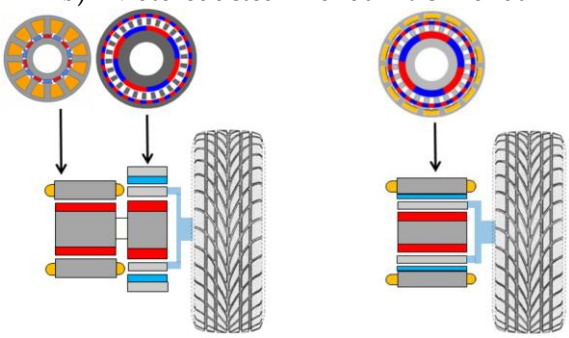


a) Motoréducteur Renault Zoé © Renault

b) Motoréducteur Honda Fit © Honda



c) Motoréducteur Chevrolet Spark © Chevrolet



d) Réducteur magnétique [LATT13]

Figure 1.11 : Différents concepts de réducteurs

Les choix de la transmission comme le nombre de rapports, les rapports de réduction et le nombre d'étages de réduction relèvent d'une optimisation système et rentrent dans le cadre de ce

travail. Nous nous limiterons au choix du rapport de réduction dans un premier temps. Le différentiel ne sera pas étudié.

1.2.2 Machine électrique

Le choix d'une machine asynchrone refroidie par convection naturelle sur ce véhicule se justifie par son cout plus faible et par sa capacité de défluxage comparé à une machine synchrone à aimants, la compacité n'étant pas le critère prédominant pour ce véhicule. De nombreuses études comparent les différents types de machines pour l'application véhicule électrique [VAPG10] [PVBG12] [KISC14]. La figure 2.2 présente les avantages et les inconvénients des différents types de machines existantes. Les machines sont dans la plupart des cas triphasés comme les machines industrielles sur le réseau, mais ce n'est pas indispensable pour un véhicule électrique. Par exemple, des machines penta-phasées sont étudiées pour leur meilleure tolérance aux défauts [BEKN14].

	Avantages	Inconvénients
Machine à courant continu à inducteur bobiné	démarrage rapide ; défluxage facile ; électronique de commande simple ; couple de démarrage fort	puissance massique faible ; performances limitées à cause du refroidissement de l'induit rotatif ; pertes dans le rotor et les balais ; limite en haute tension et/ou forte courant à cause de collecteur ; vieillissement du système balais-collecteur ; encombrement axial limité par le système balais-collecteur
Machine asynchrone à cage	bruits et vibrations faibles ; structure simple et peu coûteuse ; faible ondulation du couple électromagnétique	facteur de puissance faible dû au courant magnétisant ; rendement faible à cause des pertes du rotor ; échauffement du rotor ; faible entrefer
Machine à réluctance variable à double saillance	fonctionnement en haute vitesse favorable ; défluxage facile ; rapport couple/masse élevé ; structure simple et robuste ; rotor passif ; pertes magnétiques limitées ; alimentation simple	bruits et vibrations ; ondulation du couple électromagnétique ; surdimensionnement de l'alimentation ; facteur de puissance faible ; faible entrefer
Machine synchrone à rotor bobiné	bruits et vibrations faibles ; réalisation simple ; rotor robuste ; défluxage facile grâce à la réduction aisée du courant d'excitation du rotor ; facteur de puissance réglable	système bagues-balais fragiles ; limitation du nombre de pôles ; vitesse de rotation limitée à cause des contacts glissants ; pertes du rotor
Machine synchrone à réluctance variable	pertes magnétiques limitées et rendement élevé ; fonctionnement aisé en haute vitesse grâce au rotor massif	facteur de puissance faible ; réalisation du rotor complexe en grande série à cause d'un grand rapport de saillance nécessaire
Machine synchrone à aimants permanents	puissance massique élevée ; rapport couple/masse et couple/volume importants ; facteur de puissance élevé ; rendement élevé (avec des aimants à base de terre rare) ; refroidissement facile ; alimentation simple; faible taux d'harmoniques ; bruits et vibrations faibles ; faible inertie mécanique du rotor	risque de démagnétisation ; tenue mécanique des aimants pour les aimants montés en surface ; pertes par courants de Foucault dans les aimants ; défluxage contraignant en haute vitesse ; température maximale des aimants permanents limitée ; coût des aimants permanents

Figure 1.12 : Analyse comparative des machines électriques [WU12]

Le choix de la technologie machine est finalement bien difficile et les constructeurs implantent dans les nouveaux véhicules tous types de moteur. Par exemple :

- Machine asynchrone à cage : Renault Twizy, Mia, Tesla model S;
- Machine synchrone à aimants: Nissan Leaf, Mitsubishi i-Miev, Bollore Bluecar (Autolib) ;
- Machine synchrone à rotor bobiné : Renault Zoé, Fluence et Kangoo ;
- Machine synchro-reluctante à aimants : BMW i3.

Nous ne chercherons pas dans cette thèse à résoudre ce problème qui reste ouvert, mais qui pourrait être abordé avec des outils d'optimisation. Les travaux menés ici s'intéresseront aux dimensions d'une machine à technologie donnée qui est la machine asynchrone du Twizy.

1.2.3 *Onduleur*

Deux grandes familles de transistors sont utilisées aujourd'hui pour l'électronique de puissance des véhicules : MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor ou transistor à effet de champ à grille isolée) et IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor ou transistor bipolaire à grille isolée. Les onduleurs (DC/AC) constitués découpent un signal continu pour le rendre alternatif à des fréquences entre 5 et 20 kHz dans l'automobile. Ce découpage est généralement réalisé par une méthode de MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion). Avec une tension batterie d'environ 50 V, et une puissance de 13 kW, l'onduleur du Twizy est à base de MOSFET, avec une fréquence de découpage de 16 kHz. Ces transistors sont également utilisés pour le hacheur (DC/DC) qui alimente le réseau auxiliaire 14 V et le chargeur du véhicule. Sur le Twizy, l'ensemble est refroidi par convection naturelle au travers de dissipateurs thermiques. La Figure 1.13 présente un aperçu des différentes technologies utilisées pour les convertisseurs de puissance en fonction de la fréquence de découpage et de la puissance.

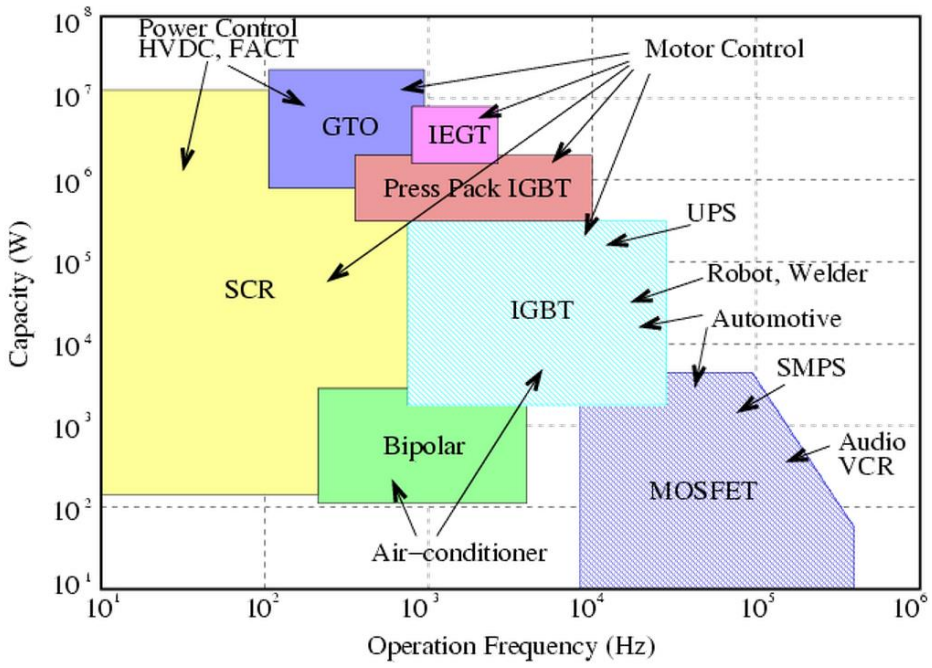


Figure 1.13 : Utilisation de différents types de transistors en fonction des applications [PARK04]

Pour les applications automobiles, les MOSFET et IGBT sont principalement utilisés. De nouveaux matériaux émergent afin de remplacer le silicium des MOSFET et IBGT : le carbure de silicium (SiC) et le nitrure de Galium (GaN). Ces matériaux promettent des fréquences des commutations plus élevées, des pertes fortement réduites et des températures de fonctionnement plus élevées [KAUK10] qui permettront des systèmes de refroidissement plus compact.

Le choix de la technologie est généralement donné par les puissances et tensions en jeu et ne relève alors pas d'une optimisation. Des choix restent à faire sur les calibres en courant, tension, puissance ainsi que sur les fréquences de découpage. Leur intégration ou non dans une optimisation système sera discuté dans ce travail.

1.2.4 Batterie

Les véhicules électriques actuels ont des batteries au Lithium-ion (ou Li-ion). Ces packs de batteries sont un assemblage de dizaines ou centaines de cellules, en série ou en parallèle. Les cellules sont composées d'électrodes en mélanges composites. L'anode négative est généralement à base de carbone. La cathode positive peut être formée de différentes chimies [TRDE12]. Pour une batterie de traction de ~20kWh ou plus, les 4 principales chimies sont :

- LMO : Lithium Manganese Oxide, c'est la chimie de la batterie du Twizy ;
- NMC : Nickel Manganèse Cobalt ;
- NCA : Nickel Cobalt Aluminium ;
- LFP : Lithium Fer Phosphate.

La Figure 1.13 compare ces chimies sur une cible Energie / Cout / Puissance / Sécurité / Durabilité. Ce choix nécessitera de faire des compromis et dépendra des orientations des constructeurs.

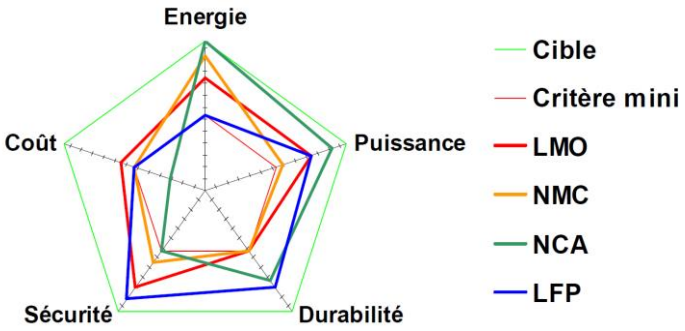


Figure 1.14 : Comparaison des chimies de batterie Li-ion à la cathode [TRDE12]

Les évolutions de ces batteries Li-ion sont rapides : l'alliance Renault-Nissan a annoncé un doublement de la capacité des batteries en 2017. D'autres technologies comme le Li-Soufre ou le Li-Air sont à l'étude pour augmenter plus encore la densité énergétique (Figure 1.15) à l'échéance 2030 d'après Toyota.

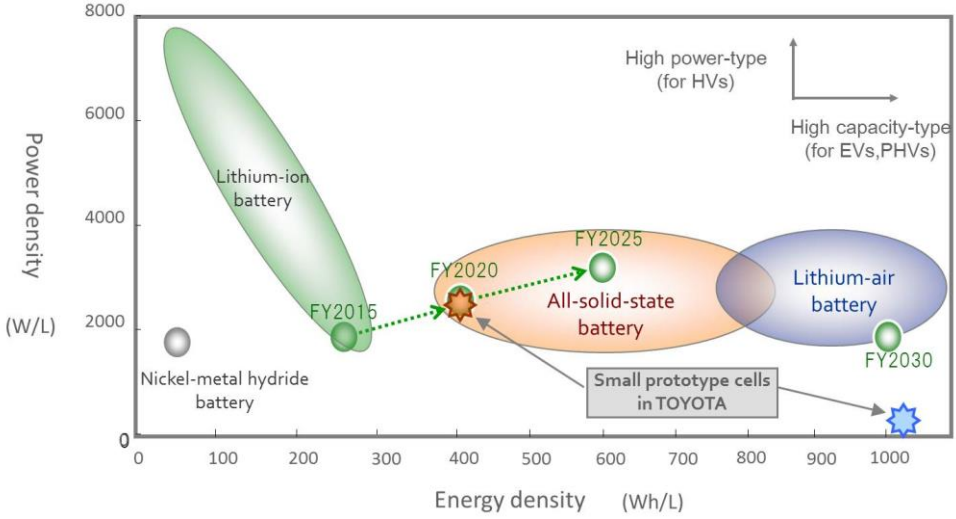


Figure 1.15 : Diagramme de Ragone : puissance en fonction de l'énergie ©Toyota

Les choix des constructeurs par rapport à la chimie des batteries sont variés et relèvent de compromis entre les différents critères cout, énergie, puissance, durabilité et sécurité. Les nombres de cellules intégrées dans les packs de batterie qui détermineront la tension disponible et le courant maximal seront étudiés dans ce travail.

1.3 Positionnement du travail

Ce paragraphe décrit le positionnement de ce travail dans le cycle de développement caractéristique de l'entreprise Renault.

1.3.1 Processus de conception

Le processus de conception propose un enchainement d'étapes permettant la réalisation d'un cahier des charges. Le cahier des charges est un document qui définit les besoins, la finalité et les contraintes d'un système. En fonction du domaine étudié (bâtiment, informatique, génie électrique, …), différents types de processus de conception seront utilisés : en cascades, itératifs, « en V ». Dans l'automobile, et c'est le cas chez Renault, le processus en V est souvent utilisé. Il se décompose en deux grandes phases : la phase de « descente du V » qui est une phase de conception et la phase de « remontée du V », qui est une phase d'intégration [DELI11].

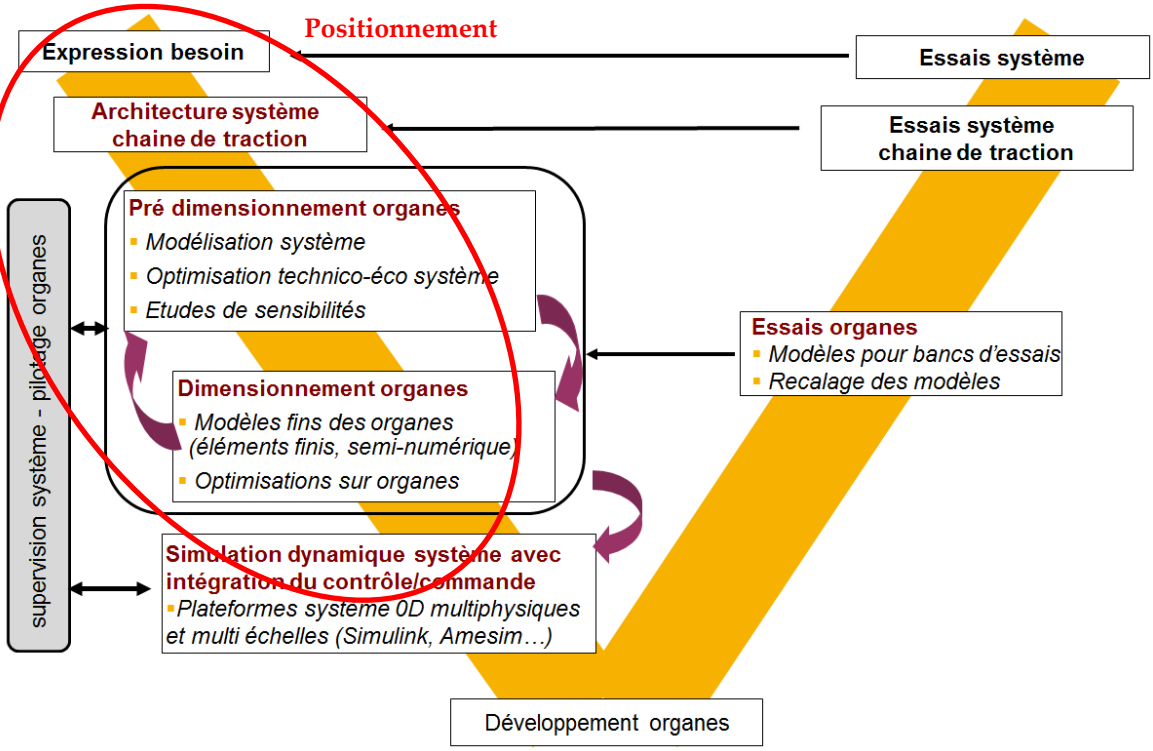
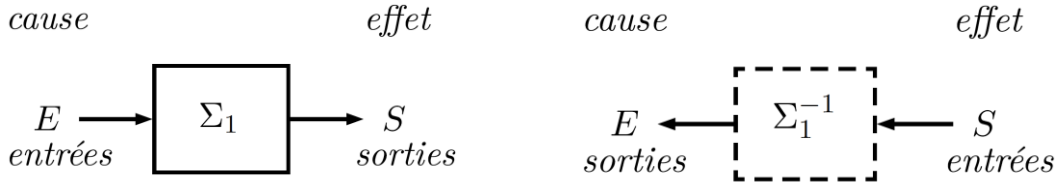


Figure 1.16 : cycle en V utilisé par « Renault »

La Figure 1.16 est un cycle en V utilisé par Renault dans le cadre des projets de chaines de traction électrique. La phase de conception repose grandement sur la modélisation des systèmes, elle permet leurs analyses, simulation et dimensionnement. La plupart des choix sont effectués lors de cette phase, alors même que la connaissance du produit est la plus faible. Notre travail s'inscrit dans cette phase amont de la conception, en s'appuyant sur des outils de conception assistée par ordinateur et de simulation numérique. Ces outils prennent la forme de logiciels d'aide à la conception. Cette conception exploite des modèles dont l'orientation des entrées/sorties va permettre d'atteindre le besoin exprimé.

1.3.2 Conception par optimisation

Un modèle est un objet considéré comme représentatif d'un système ou d'un phénomène. C'est un système fictif, qui assemble des équations associées à certaines hypothèses afin de pouvoir tirer des conclusions. Un modèle est orienté, c'est-à-dire qu'à partir de variables d'entrée, il fournit un résultat. On peut distinguer les modèles comportementaux, qui à partir des causes permettent d'estimer les effets (Figure 1.17a); et les modèles inverses qui retournent cette causalité (Figure 1.17b).



a) Modèle de comportement ou direct

b) Modèle de dimensionnement ou inverse

Figure 1.17 : Représentation du modèle comportemental direct et de son modèle inverse associé [REIN14]

Un modèle de comportement est idéal pour la conception lorsque son inversion est unique, c'est-à-dire si une seule cause peut produire l'effet escompté [GILL09]. En effet, l'inversion permet de rendre le développement plus rapide et moins volumineux puisque le travail est fait une fois pour toutes. Or les modèles ne sont en général pas inversibles, il existe des degrés de liberté pour la conception qui permettent de respecter le cahier des charges. Ces degrés de liberté peuvent être imposés par certaines hypothèses afin d'obtenir un modèle inverse qui limitera l'espace des possibilités. C'est le cas des machines électriques pour lesquelles il existe souvent des modèles de dimensionnement avec des hypothèses fortes [BOOL97].

Lorsque l'inversion est impossible, à cause par exemple de non linéarités, ou implique trop d'hypothèses, il est possible de dimensionner un dispositif à partir d'un modèle de comportement avec des outils d'optimisation qui permettront son inversion (Figure 1.18). Quand le système étudié est composé de plusieurs composants, et que l'on souhaite simuler plusieurs phénomènes physiques, les modèles de comportements s'avèrent plus adaptés notamment pour simuler les bouclages qui peuvent exister entre modèles multi-physiques.

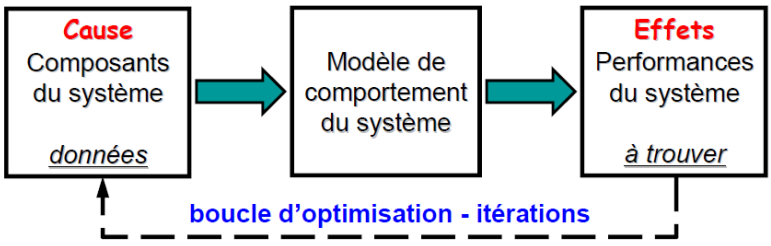


Figure 1.18 : Modèle de comportement pour résoudre un problème inverse à l'aide d'un algorithme d'optimisation [MEŞT07]

Utiliser les outils d'optimisation dès les phases amont de conception du cycle de développement augmente énormément le potentiel d'amélioration du dispositif. Si l'outil d'optimisation est utilisé en aval du cycle de développement, les choix principaux seront déjà faits et l'apport de l'optimisation restera modeste. Cette approche est encore peu répandue chez Renault où l'optimisation est utilisée plus tard dans le cycle de développement. Etre en mesure d'établir les meilleurs compromis en termes de cout, performance et autonomie sur la chaine de traction complète dès les phases amont permettraient de mieux orienter le développement, et de l'accélérer. **Pour arriver à ce résultat, l'outil de conception doit pouvoir intégrer les différents composants du système et leurs physiques associées, en partant d'un cahier des charges au niveau véhicule, tout en conservant des temps de calcul compatibles avec les méthodes d'optimisation pour explorer au mieux l'espace des possibilités.**

1.4 Démarche et orientations scientifiques

Notre travail s'oriente autour de 3 axes de recherche qui constitueront la démarche scientifique afin de répondre au besoin d'une conception plus optimale de la chaine de traction électrique.

1.4.1 Conception optimale selon l'approche système

Dans une démarche de conception d'un véhicule, le besoin est énoncé au niveau du système. Le cahier des charges spécifiques à chaque composant n'est accessible que par la vision système. Il n'est pas aisé de le définir, car chaque composant agit sur les autres. Dissocier le besoin de chaque composant pour les concevoir séparément mène à un dimensionnement sous-optimal. Dans le cas d'une chaine de traction électrique, le processus de conception d'un composant du système doit nécessairement dépendre des autres composants pour aboutir à un résultat optimal. Cette approche est d'autant plus pertinente que le nombre de composants de la chaine est grand : plus le nombre de composants intégrés au modèle est important plus le gain potentiel est élevé (Figure 1.19).

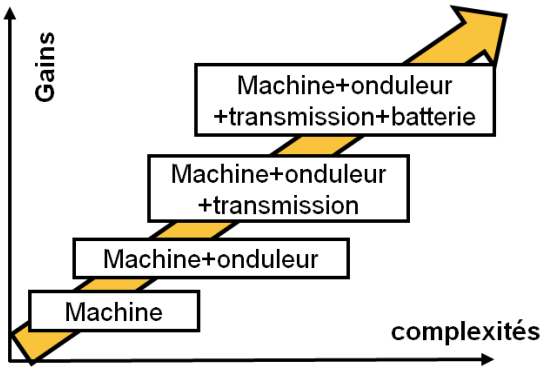


Figure 1.19 : Evolution du gain en fonction de l'intégration des composants de la chaine

L'approche système permettra par exemple, d'intégrer les éléments suivants :

- L'impact de la masse des composants et des inerties des parties tournantes sur les performances du véhicule, plutôt que de dimensionner les composants pour une puissance donnée qui dépend en réalité de la masse des composants eux-mêmes ;
- L'impact de la chute de tension de la batterie en cas d'appel de courant sur la tension disponible au niveau de la machine électrique, plutôt que de dimensionner une machine à une tension fixée ;
- L'impact de la vitesse de rotation maximum de la machine électrique sur les pertes de la transmission qui lui sera associé.

L'étude systémique est généralement peu répandue en entreprise, à cause entre autres de l'organisation structurelle. En effet, les équipes sont souvent dédiées à l'étude d'un composant ou d'une physique. La gestion des compromis entre équipes est complexe.

Pour permettre un gain maximum, une conception optimale basée sur l'approche système doit s'effectuer dès le début du cycle de conception, tant que les données d'échange entre les composants, comme la vitesse de rotation machine ou les tensions de fonctionnement ne sont pas figées.

La conception optimale systémique est le 1er axe de recherche de ce travail : quel niveau de modélisation et quelles variables considérer pour chaque composant ?

1.4.2 Déclinaison du cahier des charges sur le système

Afin de concevoir une chaine de traction optimale par une approche systémique, il est nécessaire de remonter au cahier des charges au niveau véhicule : quels sont les besoins et performances désirées pour le véhicule ? De manière non exhaustive, ces performances peuvent être :

- Gravir une pente donnée ;
- Atteindre une vitesse maximale sur plat ou en pente ;
- Accélérer jusqu'à une certaine vitesse en un temps donné ;
- Parcourir un maximum de distance suivant un cycle de roulage. Un cycle est représenté par la vitesse du véhicule en fonction du temps, par exemple sur la Figure 1.20 le cycle « Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle » (WLTC) de classe 3, qui sera utilisé pour l'homologation des véhicules usuels à l'avenir.

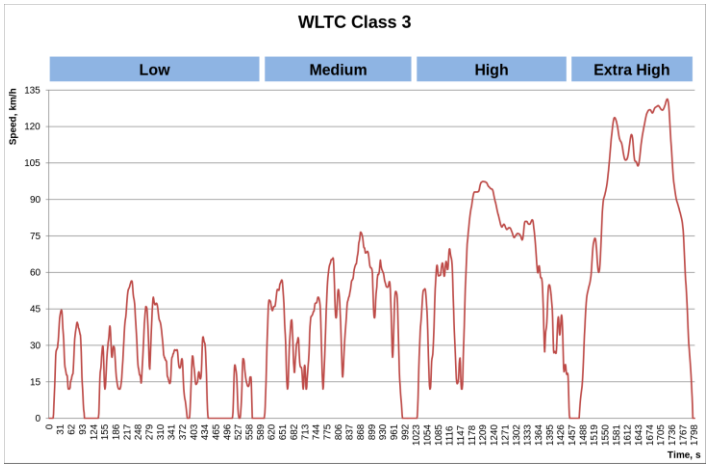


Figure 1.20 : Cycle de roulage WLTC pour véhicule de classe 3

D'autres cycles spécifiques à chaque constructeur sont également utilisés, ils peuvent représenter des usages précis urbains, routiers, autoroutiers ou montagnards.

En plus de ce cahier des charges pour le véhicule, chaque composant aura ses contraintes propres limites de dimensions, de courants, de températures, de bruit, pré requis de processus de fabrication ou de durabilité, etc. Certains de ces éléments sont généralement vérifiés plus en aval du développement, soit par des modèles très lourds en calcul, soit par des essais longs et couteux.

L'intégration des contraintes liées aux différentes physiques du système est le 2ème axe de recherche de ce travail. Comment décliner le cahier des charges véhicules sur les composants et quelles contraintes est-il possible d'intégrer en amont dans la phase de conception ?

1.4.3 Problématique du temps de calcul en conception

Pour notre processus de conception par optimisation nécessitant l'appel à des algorithmes d'optimisation, le nombre d'évaluations du modèle peut devenir très important. Plus le nombre de variables, de contraintes et d'objectifs augmente, plus le nombre d'évaluations risque d'être grand. Dans l'exemple d'une optimisation qui ferait 1000 appels à modèle de 1 min 30 s, le temps d'optimisation dépasse déjà les 24 h. Ces temps entrainent différents ressentis pour le concepteur qui peuvent être classés comme dans la Figure 1.21 [GILL09].

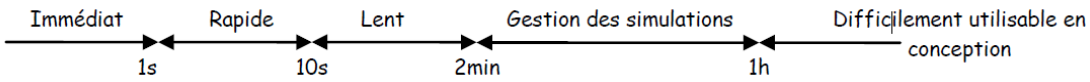


Figure 1.21 : Ressenti d'un temps de calcul par un concepteur [GILL09]

Dans le cas d'une conception par optimisation d'une chaine de traction pour VE, plusieurs particularités peuvent avoir de forts impacts sur le temps de calcul et le rendre inadapté :

- Le nombre de composants et de physiques ;

- Le nombre d'éléments à simuler pour respecter le cahier des charges avec les performances du véhicule et les cycles de roulage ;
- Les degrés de liberté qu'il peut y avoir pour contrôler la machine électrique ou une éventuelle boite de vitesse.

Par ailleurs, la définition du cahier des charges en phase amont peut évoluer au cours des projets, impliquant l'ajout ou la modification de composants et donc des modèles. Les résultats d'une conception système amèneront eux-mêmes des réflexions et des discussions au niveau des équipes dédiées à chaque composant, et par conséquent des adaptations de modèles spécifiques à chaque projet. Si le processus d'optimisation système dure trop longtemps (mois, ou semaine), les modifications qu'il faudra y apporter risquent de trop allonger les phases de conception.

La réduction du temps de calcul sera le 3ème axe méthodologique de ce travail : quelles sont les hypothèses, simplifications ou méthodes qui permettent de conserver un temps de calcul acceptable en dégradant au minimum la précision des résultats ?

1.5 Bilan

Dans ce chapitre introductif, nous avons présenté les enjeux environnementaux liés au véhicule électrique : zéro émission à l'usage au profit de la qualité de l'air notamment en ville ; pollution sonore réduite aux vitesses faibles ; analyse de cycle de vie (épuisement des ressources, impact sur la santé humaine, changements climatiques et l'acidification des sols ou des océans) globalement plus intéressante que pour un véhicule à combustion, et encore plus à moyen/long terme. Des leviers d'amélioration sont envisagés pour baisser les couts et augmenter l'autonomie qui restent des critères limitants. Notre travail concerne le levier d'amélioration de la chaine de traction électrique.

Puis nous avons décrit la chaine étudiée. Il s'agit de celle du Renault Twizy avec un réducteur à rapport unique, une machine asynchrone à cage d'écureuil, un onduleur avec des MOSFET et une batterie lithium-ion.

Notre travail se situe en amont du cycle en V, dans une phase de pré-dimensionnement qui permettra de trouver les bons compromis pour faire des choix. Dans ce cadre nous avons orienté notre travail vers une méthode de conception par optimisation plutôt que de dimensionnement pur afin d'explorer au mieux l'espace des possibilités. Trois axes de recherche ont ainsi été définis :

- la conception optimale systémique. Quel niveau de modélisation et quelles variables considérer pour chaque composant ?
- l'intégration des contraintes liées aux différentes physiques du système. Comment décliner le cahier des charges véhicules sur les composants et quelles contraintes est-il possible d'intégrer en amont dans la phase de conception ? Il s'agira ici d'intégrer la notion de cycle de roulage et de contraintes de performance au niveau véhicule ;
- la réduction du temps de calcul. Quelles sont les hypothèses, simplifications ou méthodes qui permettent de conserver un temps de calcul compatible avec une phase amont de développement ?

-

Chapitre 2 Modélisation de la chaine de traction

Le challenge dans la phase de modélisation est de choisir le bon niveau de modèle qui permettra de simuler les phénomènes requis pour notre objectif de conception par optimisation tout en étant rapide. Il s'agit non seulement de faire des choix pour les modèles de composants, mais également de faire des choix sur les liens et causalité entre les modèles.

Dans la première partie, nous discutons les différents modèles possibles, en termes de précision et d'échelles temporelles pour pouvoir intégrer plus ou moins de phénomènes physiques. Cette partie permettra de mettre en place les principales hypothèses qui seront effectuées pour répondre à nos objectifs. La deuxième section présente les modèles utilisés pour chaque composant de la chaine de traction avec leurs physiques. La dernière partie détaille le chainage des modèles et présente des résultats de simulations dans différentes conditions pour souligner l'intérêt de la modélisation système.

2.1 Complexité du choix des modèles

Pour un même composant ou un même système, il peut exister plusieurs niveaux de modélisation en fonction de l'objectif souhaité. On parle alors de modèle de granularités ou d'échelles temporelles différentes. Par exemple, il est possible de calculer un couple moyen avec un modèle rapide, mais il faudra utiliser un modèle plus fin et plus long pour connaitre l'évolution de ce couple en fonction du temps autour de la moyenne. Chaque modèle est dédié à calculer ce pour quoi il a été conçu dans la limite des hypothèses. L'agencement des modèles entre eux pour obtenir le système offre également diverses possibilités. Nous étudierons ici les critères qui permettront de faire un choix pour cette modélisation : la précision sur les grandeurs calculées, le temps du calcul, les différentes échelles temporelles qui régissent les physiques étudiées ainsi que les choix d'entrées et sorties pour orienter les modèles.

2.1.1 Compromis précision et temps de calcul

Nous distinguerons trois familles de méthodes de modélisation : les méthodes numériques, les méthodes semi-numériques et les méthodes analytiques. La Figure 2.1 représente ces méthodes sur

un « front de Pareto » de la rapidité de calcul en fonction de l'erreur de modélisation. Ce front montre qu'une amélioration de la qualité des résultats va souvent de pair avec un allongement du temps de calcul. Ce constat n'est pas une vérité générale, certaines méthodes de résolution analytique peuvent donner des résultats très proches des modèles numériques [FALA15].

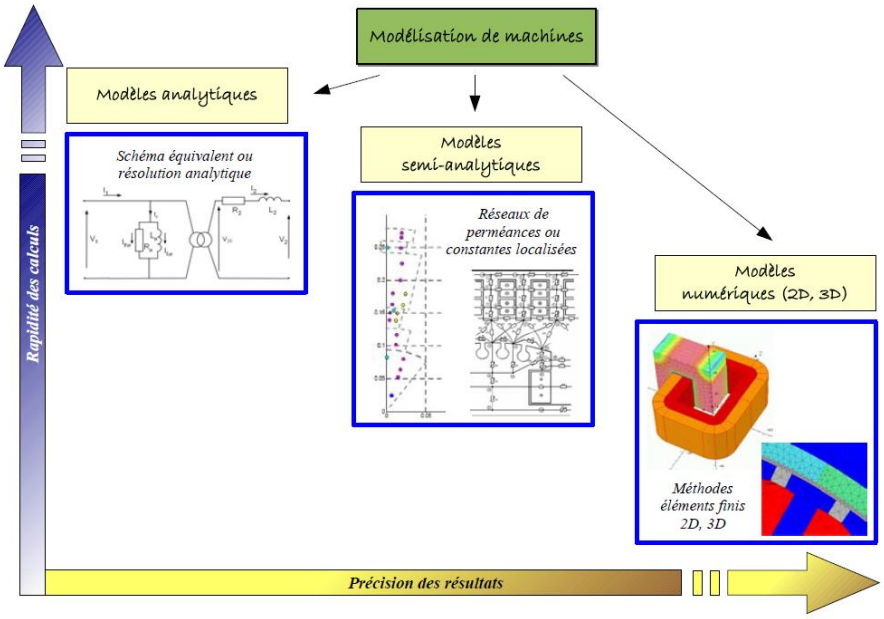


Figure 2.1 : Front de Pareto des méthodes de modélisation [TRAN09]

Les méthodes analytiques reposent sur une formulation explicite des grandeurs caractérisant le système. Des équations permettent de relier les grandeurs fonctionnelles de performance du système aux grandeurs descriptives géométriques. Même si les modèles analytiques peuvent retranscrire le comportement d'un système avec une certaine précision [EMEM03], ils impliquent souvent des hypothèses fortes : milieu linéaire, signaux temporels au sens du 1er harmonique, phénomènes négligés, etc. Pour un modèle analytique, le compromis dépend donc beaucoup des hypothèses effectuées. Par ailleurs, chaque changement important dans la structure du composant, par exemple la technologie de la machine ou la chimie de la batterie, nécessitera de repenser le modèle et d'en adapter les hypothèses. Un avantage important des modèles analytiques est la rapidité de résolution, qui permet de les exploiter facilement avec des algorithmes d'optimisation nécessitant de nombreuses évaluations. Les modèles technico économiques d'estimation des couts rentrent également dans la catégorie des modèles analytiques.

Les méthodes numériques regroupent plusieurs techniques, dont les éléments finis, différences finies ou intégrales aux frontières [BRUN90]. Ces méthodes consistent à discrétiser l'espace pour pouvoir approximer une solution à des équations différentielles aux dérivées partielles comme les équations de Laplace ou de Poisson par exemple. De nombreuses physiques peuvent être traitées au travers de systèmes d'équations comme les équations de Maxwell pour l'électromagnétique ou de Navier-Stokes pour les écoulements fluidiques. L'espace peut être par exemple divisé en tétraèdres pour une structure tridimensionnelle, dont chaque sommet est appelé nœud et constitue le nombre d'inconnus du système. La précision de ce maillage est donc directement liée aux nombres d'inconnus et par suite au temps de résolution. Ces approches ont été implémentées dans des logiciels

où le travail de l'utilisateur consiste à décrire la géométrie, renseigner les caractéristiques des matériaux, choisir des paramètres de maillage ainsi qu'à définir les conditions aux limites (de type Neumann ou Dirichlet par exemple). C'est le cas du logiciel Maxwell® qui sera utilisé ici. Après un temps de calcul qui peut devenir conséquent pour les modèles 3D, l'utilisateur peut réaliser des post-traitements pour extraire les performances du système, ou visualiser la distribution de certaines grandeurs dans la géométrie comme dans la Figure 2.2.

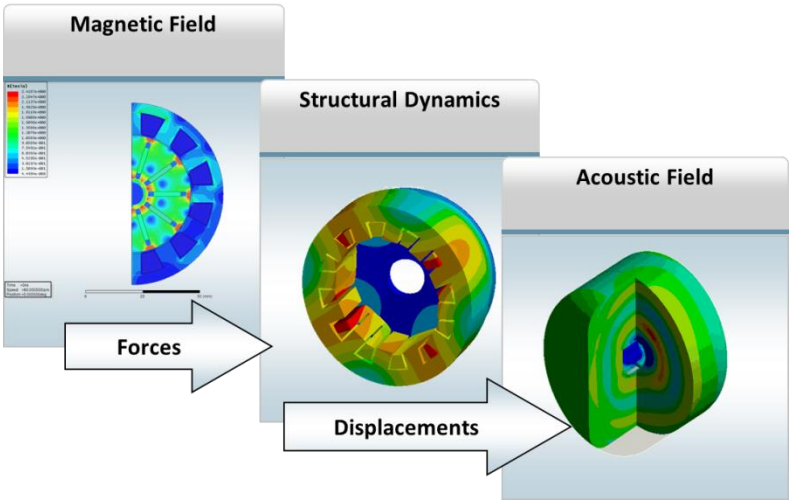
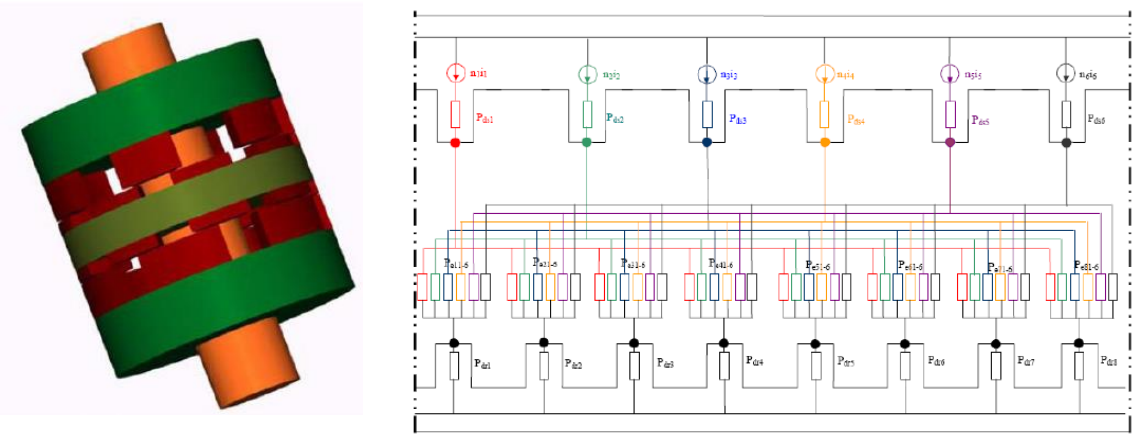


Figure 2.2 : Exemple d'un modèle numérique d'une machine électrique pour différentes physiques avec les outils Ansys® [ANSY14]

Pour l'application chaine de traction, les éléments finis peuvent être envisagés pour les différentes physiques de la machine électrique : électromagnétique, thermique, vibratoire ; ainsi que pour la thermique de l'onduleur ou la mécanique de la transmission. Les modèles numériques permettront ainsi de calculer des grandeurs auxquelles un modèle analytique n'aurait pas accès. Dans la phase de conception amont, ces modèles servent surtout à la validation des modèles analytiques. L'exploitation de ces modèles avec un algorithme d'optimisation sera en général trop couteuse en temps de calcul. Les résultats d'une optimisation analytiques seront systématiquement vérifiés par éléments finis. Si cette validation n'est pas concluante, il est possible de reprendre le modèle analytique pour rectifier ou compléter les éléments non validés. Ces itérations sur l'optimisation peuvent être automatisées au travers de stratégies d'optimisation qui seront développées au Chapitre 3.

Les méthodes semi-analytique ou semi-numérique sont des méthodes hybrides entre les deux précédentes. La formulation des éléments du réseau se fait de façon analytique, mais la résolution du système d'équations est numérique. On peut citer par exemple les modèles à constantes localisées comme un réseau de perméances pour un circuit magnétique ou un réseau nodal pour une modélisation thermique [HAMI93]. Comme pour les modèles numériques, la rapidité et la précision dépendront beaucoup de la granularité du réseau. Ces modèles nécessitent en général de bien connaitre le dispositif pour estimer correctement les coefficients thermiques d'un modèle nodal par exemple, ou les trajets du flux au sein d'une machine pour un modèle magnétique. La Figure 2.3 représente le schéma d'un réseau de perméances d'une machine à réluctance variable à flux axial [CGBR08]. Les différentes parties de la machine, culasses, dents, encoches, entrefer, sont modélisées

par une ou plusieurs réluctances. Les valeurs des réluctances dépendront de la géométrie et des matériaux. Les méthodes semi-analytiques n'ont pas été retenues pour ce travail, dans l'optique de conserver des temps de calcul faibles, l'objectif étant une optimisation du système dans sa globalité.



a) Vue en 3 dimensions b) Réseau de perméances

Figure 2.3 : Réseau de perméances d'une machine à Réluctance variable à flux axial [CGBR08]

Ces différentes « granularités » de modèles peuvent donc impliquer des temps calculs qui varient fortement. En plus de ce compromis nécessaire sur la granularité, l'association de plusieurs phénomènes physiques peut amener à manipuler des échelles temporelles très différentes.

2.1.2 *Différentes échelles temporelles*

En fonction de la physique étudiée, les constantes de temps des phénomènes qui interviennent au sein des composants peuvent varier fortement. Le Tableau 2.1 donne l'ordre de grandeur des constantes de temps pour les physiques de la chaine de traction étudiée.

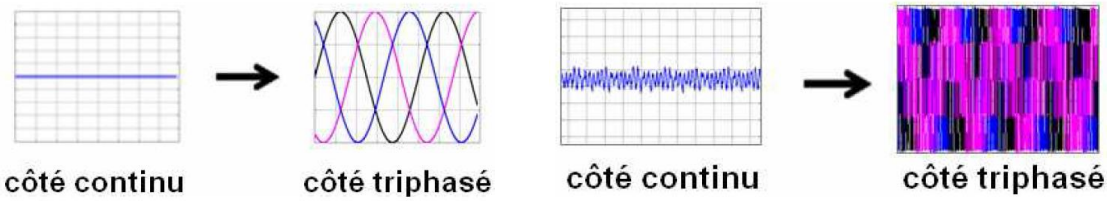
Tableau 2.1 : Echelles de temps pour les phénomènes physiques

Domaine physique	**Ordre de grandeur de la constante de temps du système**
Electronique	ns / µs
Electrique / Magnétique	ms
Mécanique	s
Thermique	h

Dans un contexte de modélisation multidynamique, pour réaliser un couplage avec une discrétisation temporelle unique, il faudrait sélectionner la plus petite constante de temps des physiques considérées, ce qui serait rédhibitoire en termes de temps de calcul. Des méthodes mathématiques comme la relaxation de formes d'onde [SGBW10] existent pour répondre à cette difficulté. Cependant une analyse préalable des phénomènes en jeu peut permettre d'utiliser des hypothèses simplificatrices permettant de réaliser l'étude à partir de grandeurs sinusoïdales, moyennées. Dans le cas de la chaine de traction, plusieurs phénomènes peuvent être simplifiés pour s'affranchir de certaines constantes de temps.

2.1.2.1 Echelle électronique

La plus petite échelle de temps du système est celle des commutations des interrupteurs de l'onduleur qui utilisent la modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour recréer un signal proche d'une sinusoïde à partir d'un signal continu. L'ordre de grandeur des fréquences de découpage dans l'automobile est entre 5 et 20kHz, pour obtenir des signaux alternatifs de quelques centaines de Hertz. Plus la fréquence de découpage est élevée, plus le signal obtenu sera proche d'une sinusoïde. La Figure 2.4 illustre la différence dans les formes des signaux en appliquant l'hypothèse d'un signal parfaitement sinusoïdal (a) ou en prenant en compte la fréquence de commutation des interrupteurs (b) [JANI11]. Le cas (b) implique donc une constante de temps en ns alors que le cas (a) peut se résumer à des valeurs efficaces qui ne dépendent pas du temps.



a) Hypothèse sinusoïdale b) Prise en compte de commutations

Figure 2.4 :Signaux en entrée et en sortie d'un onduleur en fonction de la modélisation liée aux constantes de temps [JANI11]

L'hypothèse de signaux sinusoïdaux a deux conséquences au niveau de l'onduleur de tension :

- Le calcul des pertes de l'onduleur est approximé par un calcul sur un courant moyen. La Figure 2.5 est une étude de [CANT12] qui compare les pertes avec l'hypothèse d'une forme de courant parfaitement sinusoïdale (Pmoy) et les pertes instantanées d'un modèle à commutations (Pinst). L'erreur du modèle moyen est inférieure à 1 % sur le cas test d'un onduleur pour la traction ferroviaire avec des fréquences de découpages pourtant bien plus faibles que pour l'automobile, de l'ordre de 1 ou 2 kHz ;

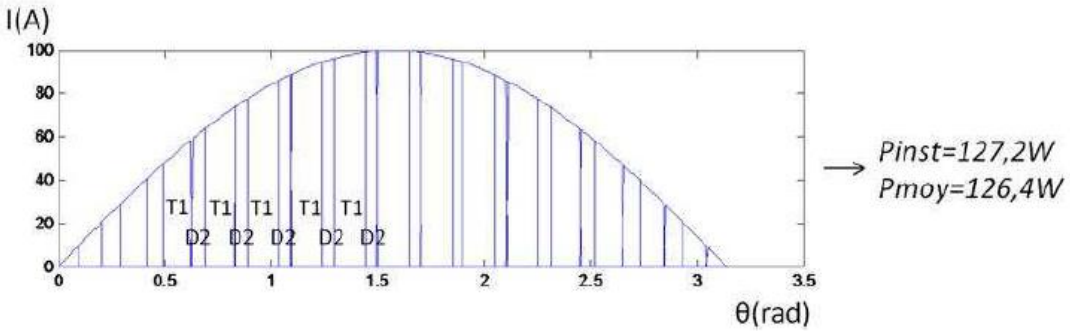


Figure 2.5 : Forme du courant pour le calcul des pertes moyennes ou instantanées d'un onduleur [CANT12]

- Les tensions appliquées à la machine ou courants absorbés par la machine comprennent en réalité des harmoniques en plus du fondamental qui sont une source de pertes supplémentaires notamment dans le fer et dans les aimants. Ces harmoniques peuvent également engendrer des oscillations de couple qui peuvent être ressenties par le conducteur.

La modélisation fine de cette interaction entre onduleur et machine a été étudiée dans [REGN03] ou [JANN10]. Lorsque la fréquence de découpage est environ 20 fois supérieure à la fréquence des grandeurs alternatives, l'effet des harmoniques peut être négligé dans le cadre d'une étude amont.

2.1.2.2 Echelle magnétique

Une hypothèse courante des modèles analytiques des machines électriques est de considérer comme sinusoïdales les grandeurs et de travailler avec les valeurs efficaces ou maximales. On parle également de l'hypothèse du « 1er harmonique ». Cependant le type de machine (synchrone, asynchrone, à réluctance…), sa topologie (nombres d'encoches), ou encore son bobinage peuvent être source d'harmoniques sur le flux magnétique et engendrer des pertes supplémentaires ainsi que des oscillations de couple, qui viennent s'ajouter à celles de l'alimentation non parfaitement sinusoïdale de la machine. La Figure 2.6 illustre les oscillations de couple (TEF, obtenu par éléments finis) autour du couple moyen (Tfund, obtenu par un modèle analytique au 1er harmonique) dans le cas d'une machine synchrone à aimants alimentée par une tension sinusoïdale [JANN10].

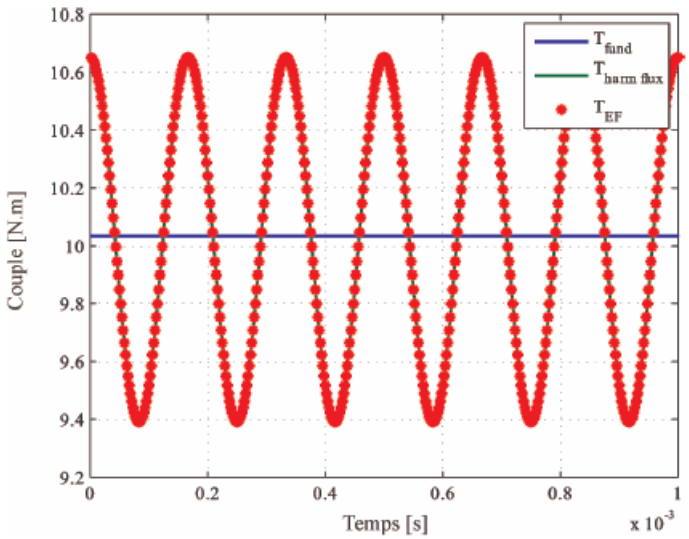


Figure 2.6 : Oscillations de couple autour du couple moyen [JANN10]

Certaines configurations de machine peuvent être très défavorables vis-à-vis de ces critères et une solution est souvent de sélectionner à partir de la littérature quelques configurations étant connues pour limiter les harmoniques [BOOL97]. Les méthodes pour prendre en compte ce phénomène par un modèle éléments finis au cours de l'optimisation seront étudiées au Chapitre 3.

2.1.2.3 Echelle électrique

Les modèles de batteries lithium-ion utilisés pour des calculs énergétiques sur cycle de roulage sont généralement des modèles « quasi-statiques » avec un circuit électrique équivalent comprenant une source de tension et une résistance, éventuellement dépendantes de l'état de charge et de la température. En l'absence de capacité dans le schéma électrique, les effets capacitifs dynamiques sont

négligés. La Figure 2.7 représente un exemple de réponse en tension à un échelon de courant pour les modèles quasi-statique et dynamique.

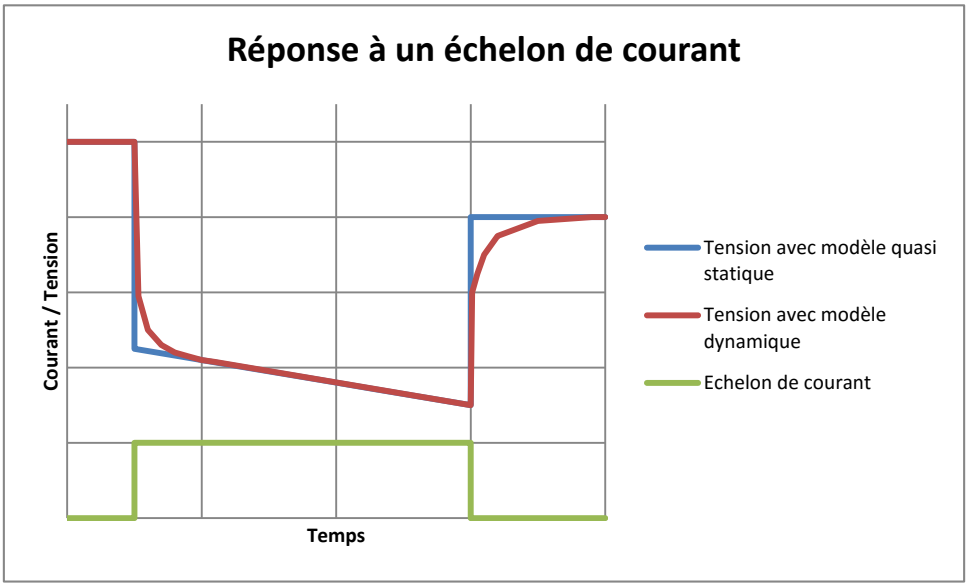


Figure 2.7 : Réponse à un échelon de courant d'une batterie en fonction du modèle

Dans [JOPS00], un modèle quasi statique nommé « ADV » et un modèle dynamique nommé « RC » avec résistances et capacités sont comparé sur un cycle de roulage d'un véhicule électrique. Le résultat est un écart de l'ordre du pourcent sur les courants et l'état de charge de la batterie. Cette approximation est donc acceptable pour notre étude de pré dimensionnement.

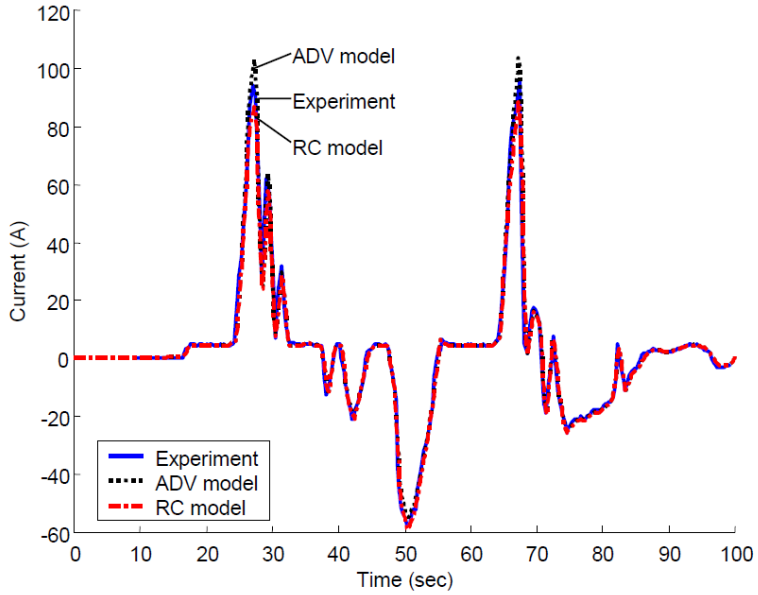
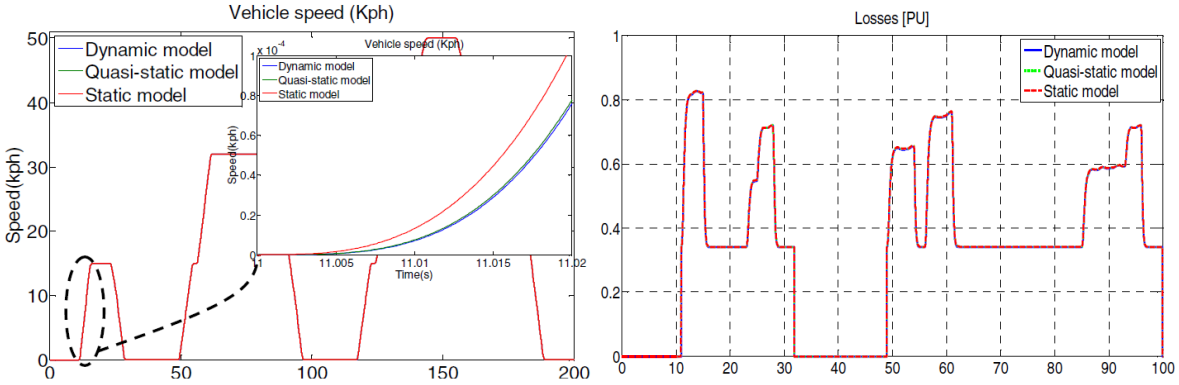


Figure 2.8 : Comparaison d'un modèle de batterie quasi statique « ADV » et d'un modèle dynamique « RC » sur un cycle de roulage [JOPS00]

2.1.2.4 Echelle mécanique

A l'échelle du véhicule, les phases d'accélération ou de freinage peuvent être simulées avec un modèle dynamique pour évaluer la qualité du temps de réponse de la commande de la chaine de traction. Cette finesse de simulation n'est cependant pas nécessaire pour des estimations énergétiques ou le cycle peut être discrétisé par une succession de régimes permanents que l'on nommera « points de fonctionnement ». En effet, la Figure 2.9 extraite de l'étude de [LBLD10] montre que les phénomènes transitoires du modèle dynamique (Dynamic model) sont de l'ordre de la milliseconde et sont négligeables face à la constante de temps mécanique du véhicule de l'ordre de la seconde (Static model).



a) Comparaison de la vitesse véhicule b) Comparaison des pertes du moteur

Figure 2.9 : Comparaison de simulations dynamique et quasi-statique [LBLD10]

La comparaison des pertes (b) montre que pour une étude énergétique, l'hypothèse d'un modèle statique entraine une erreur négligeable. Il est usuel de considérer un point toutes les secondes pour discrétiser le cycle (Figure 2.10). Dans le cadre d'une optimisation, il est possible d'envisager un nombre de points très inférieur ou de sélectionner un nombre restreint de points représentatifs [CHWL14].

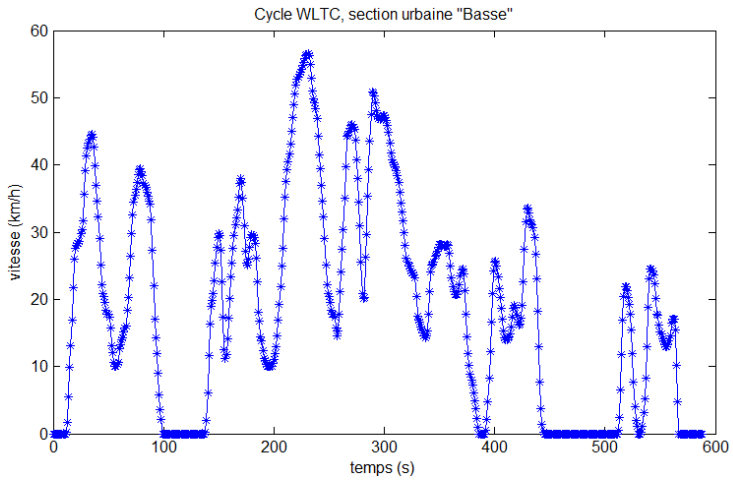


Figure 2.10 : Cycle WLTC, section urbaine « basse » discrétisée à la seconde

Dans la suite du travail, il sera donc question de points de fonctionnement en régime permanent. Cette hypothèse de simuler un enchainement de régimes permanents sera vérifiée sur banc d'essai dans le Chapitre 4.

2.1.3 Orientation du modèle

Il n'y a pas une unique possibilité pour connecter les modèles des composants entre eux. Le choix dépend de ce que le concepteur cherche à simuler. Sur un véhicule, le conducteur donne une consigne de couple en appuyant sur la pédale d'accélérateur. Celle-ci est transmise à l'onduleur et traduite en tension et fréquence à imposer à la machine électrique afin qu'elle produise le couple voulu. La vitesse du véhicule est alors une conséquence. Pour modéliser le système, il n'est pas forcément nécessaire de respecter cet ordre pour les entrées et sorties des modèles de composants. Afin de montrer cela nous allons repartir du formalisme de la Représentation Energétique Macroscopique (REM) [BOUS03] qui est méthode de représentation régie par des règles de base : la causalité intégrale et le respect des interactions dans le but de déduire une structure de commande du système étudié. La Figure 2.11 est un schéma d'une chaine de traction électrique avec moteur synchrone à rotor bobiné utilisant la représentation REM [JANI11], avec la partie actionneur en haut et la partie contrôle et mesure en bas. Cette méthodologie est adaptée pour étudier le contrôle dynamique d'un système connu, tel qu'il faudra l'implanter ensuite sur le véhicule.

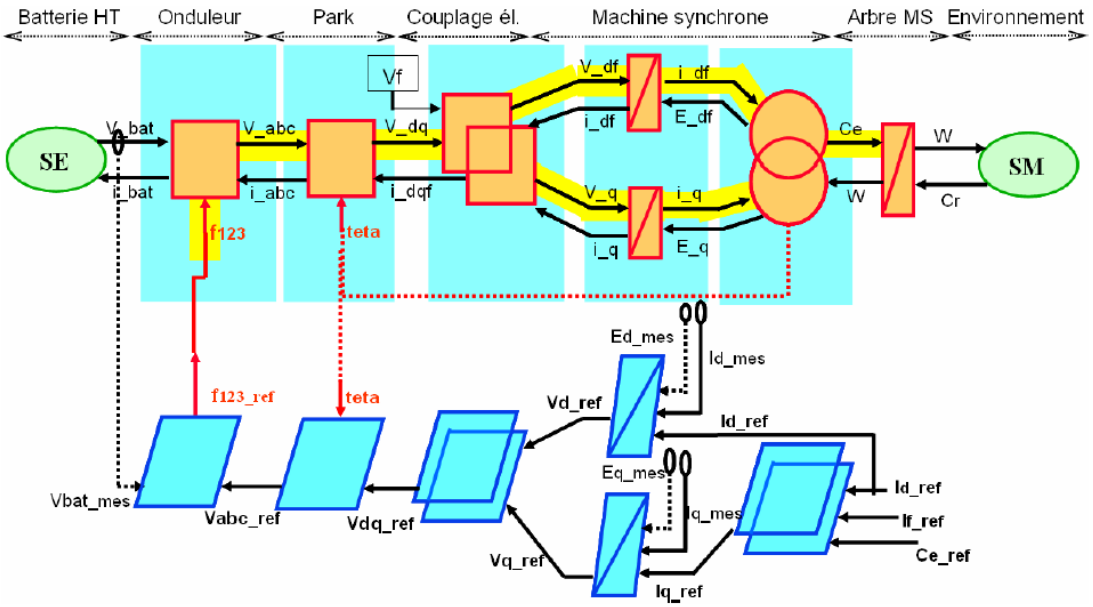


Figure 2.11 : Formalisme REM appliqué à une chaine de traction électrique [JANI11]

Cette représentation montre bien que l'environnement (le conducteur par exemple) impose un couple (Cr) et obtiendra en retour une vitesse (W). Or, dans le cas d'une conception d'une chaine de traction, le cahier des charges est une donnée d'entrée : le véhicule doit pouvoir respecter des performances connues, qui peuvent se traduire en vitesse et couple à la roue à partir du modèle de véhicule (section 0). Si la chaine de traction n'est pas capable d'atteindre les performances demandées, il n'est pas utile pour cette phase de conception de connaitre les performances réellement atteintes par le véhicule, il suffit de constater cette incapacité au travers d'une limite qui sera

dépassée, par exemple un courant ou une température maximale. Si aucune limite n'est dépassée, nous pouvons faire l'hypothèse que le contrôle dynamique est bien réalisé et permettra d'atteindre le couple demandé. Il devient alors possible d'utiliser un modèle de dimensionnements pour la partie véhicule: pour avoir une performance donnée au niveau du véhicule, il faut tel couple et telle vitesse aux roues. La Figure 2.12 schématise la structure retenue pour ce travail.

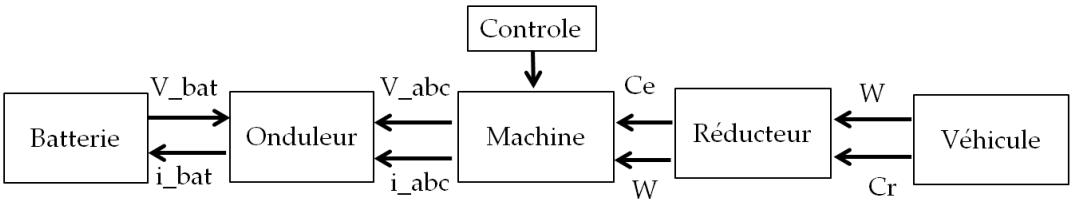


Figure 2.12 : Structure retenue pour la chaine de traction

Avec cette structure, la plupart des boucles algébriques, qui consistent à avoir besoin d'une grandeur pour calculer cette grandeur elle-même [HERZ10] sont éliminées au profit du temps de calcul. Une boucle subsiste avec la tension batterie V_bat sur la Figure 2.12 : le modèle d'onduleur a besoin de connaitre V_bat qui est donnée par le modèle de batterie qui nécessite le courant i_bat donné par le modèle d'onduleur lui-même. La gestion de cette boucle sera discutée au paragraphe 3.5.2.

2.1.4 Vocabulaire utilisé

Dans ce chapitre nous utilisons des termes qui peuvent être parfois ambigus en fonction du contexte et du modèle pour lesquels ils sont employés. Nous faisons ici le point sur le vocabulaire utilisé :

- **Points de fonctionnement en régime permanents** (ou « quasi-statique », opposé à dynamique): le cycle de roulage est discrétisé en un enchainement de régimes permanents afin d'obtenir des points de fonctionnement. Pour autant le bilan des forces sur le véhicule intègre les accélérations et freinages du véhicule. Le même vocabulaire est utilisé pour la batterie : le modèle est quasi-statique au sens ou la tension évolue au cours du temps, mais il n'est pas dynamique, car le temps d'établissement des courants n'est pas pris en compte ;
- **Commande dynamique** : il s'agit de la commande en temps réel de la machine qui détermine entre autres ses temps de réponse, elle n'est pas étudiée ici ;
- **Contrôle énergétique** : il s'agit des degrés de liberté de la chaine de traction pour un point de fonctionnement en régime permanent ;
- **Thermique en régime permanent** (*steady-state* en anglais) : il s'agit d'une température stabilisée qui n'évolue pas en fonction du temps ;
- **Thermique en régime transitoire** (*transient* en anglais) : il s'agit de calculer l'évolution de la température en fonction du temps.

2.2 Modèles des composants

Les modèles sélectionnés sont détaillés dans cette section. Nous rappelons les objectifs de ces modèles:

- Estimer l'énergie extraite de la batterie lorsque le véhicule parcourt un trajet sous la forme d'un cycle de roulage, représentatif de l'autonomie du véhicule. Il s'agit donc de calculer les forces à vaincre pour que le véhicule avance, les pertes dans les composants de la chaine de traction, et d'intégrer la puissance demandée par les auxiliaires (climatisation, phares,…) du véhicule ;
- Estimer les contraintes des composants qu'il ne faut pas dépasser (températures, résistance mécanique…) ;
- Estimer le cout des composants de la chaine de traction.

Il est nécessaire d'estimer également la masse des composants pour connaitre les forces d'avancement à vaincre pour le véhicule.

Il est important de bien distinguer l'estimation de l'autonomie, qui sera un objectif d'optimisation, de l'estimation des contraintes des composants. Une différence notable est qu'il n'est pas indispensable de calculer l'objectif avec une grande précision, il faut surtout qu'une modification du composant donne la bonne tendance sur l'autonomie. Par exemple lorsqu'un véhicule roule, les composants vont chauffer au fil des kilomètres : pneus, roulements, huile du réducteur, bobines de la machine, MOSFET, cellules batterie, etc. L'évolution de ces températures en fonction du temps a un impact non négligeable sur l'énergie consommée. Il faudrait donc simuler tous ces comportements pour estimer précisément l'autonomie. Dans le cas d'un objectif d'optimisation pour le pré dimensionnement de la chaine de traction, nous pouvons faire l'hypothèse que ces températures sont fixes pendant le cycle. Par contre il est important de modéliser l'impact des températures sur les composants, pour pouvoir respecter le cahier des charges de performances véhicule dans des conditions données (un pays où il fait très froid par exemple). Il est également nécessaire de pouvoir estimer les températures qui sont des contraintes de dimensionnement, comme c'est le cas pour la machine ou l'onduleur.

Les modèles de véhicule, transmission, machine, onduleur et batterie ont été mis en place à partir des choix technologiques du Twizy. La Figure 2.13 résume les types de modèles développés dans le cadre de ce travail :

- **Modèle véhicule :** bilan des forces pour connaitre la vitesse et le couple nécessaires aux roues pour suivre un cycle de roulage à partir de caractéristiques du véhicule (2.3.1) ;
- **Modèle de transmission** : modèle simplifié basé sur des essais qui permet d'estimer les pertes du réducteur en fonction de : couple, vitesse et température d'huile (2.2.2) ;
- **Modèle de machines** : modèle analytique basé sur un schéma équivalent obtenu à partir des dimensions de la machine (2.2.3) ;
- **Modèle d'onduleur** : modèle analytique qui permet d'estimer les pertes à partir des données de la fiche technique des MOSFET (2.2.4) ;
- **Modèle de batterie** : modèle électrique qui exploite des cartographies de tension et résistances en fonction de l'état de charge et de la température (2.2.5).

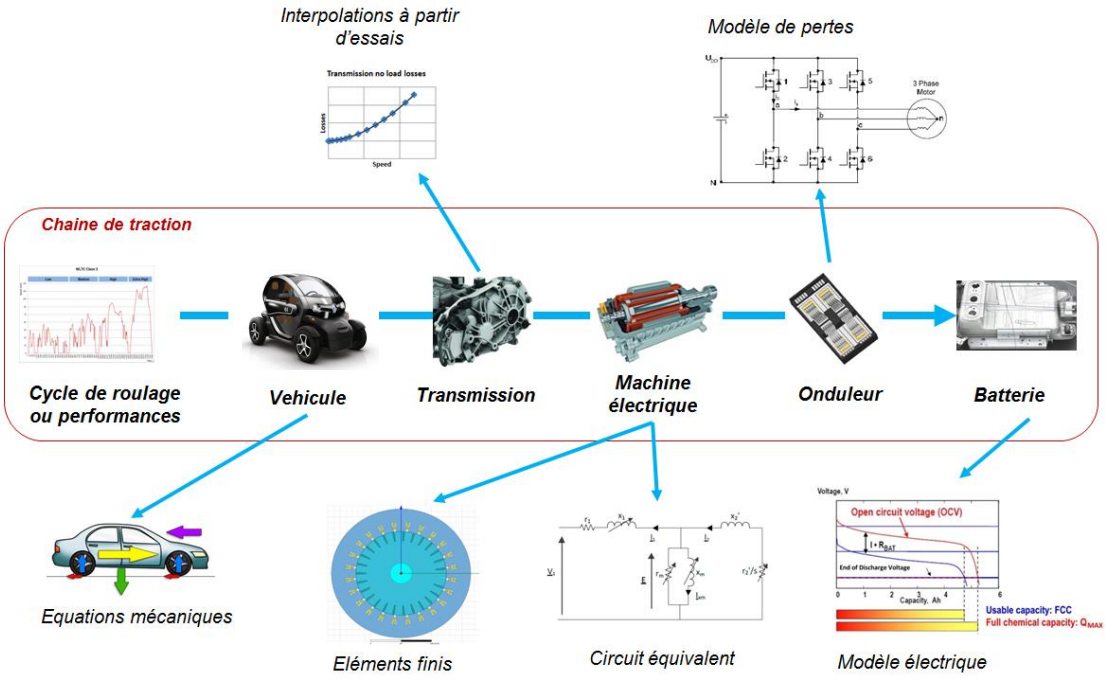


Figure 2.13 : Représentation schématique des modèles utilisés pour chaque composant

Pour chaque composant, la structure suivante sera utilisée

- Le modèle analytique sera décrit, en particulier l'estimation des pertes ;
- Un schéma bloc résumant les entrées et sorties du modèle sera présenté ;
- Les modèles permettant de calculer la masse et le cout des composants seront décrits ;
- Une cartographie de rendement dans le plan couple en fonction de la vitesse sera tracée afin de s'assurer du bon comportement du modèle sur toute la plage de fonctionnement. L'étendue de la plage de fonctionnement moteur et freinage présentée sera la même pour les différents composants étudiés. Elle est limitée par les contraintes des modèles de machine, d'onduleur et de batterie, mais n'inclue pas les limites propres aux capacités de freinage électrique du véhicule :
    - Présence ou non d'une pédale de frein découplée et choix de la puissance de freinage « au levé de pied »; par exemple sur le Twizy, la pédale de frein n'est pas découplée ce qui signifie qu'elle n'amplifie pas la récupération d'énergie, car elle utilise uniquement les freins mécaniques. Cependant une récupération « au levé de pied » est présente, c'est-à-dire quand le conducteur relâche la pédale d'accélérateur. Le choix a été fait d'avoir un freinage assez léger lorsque le conducteur lâche la pédale d'accélérateur. La plage de récupération est donc en réalité bien plus restreinte,
    - Tenue de route ; la récupération d'énergie au freinage n'a lieu que sur 2 roues dans le cas d'un véhicule à 2 roues motrices. Dans ce cas, la puissance maximale de freinage électrique se trouve limitée pour garder une bonne tenue de route,
    - Etat de charge de la batterie ; si la batterie est pleine, elle ne pourra pas récupérer d'énergie. Cette limite est fixée par une tension à ne pas dépasser pour les cellules.

2.2.1 Modèle du véhicule

Le modèle du véhicule permet d'estimer les couples et les vitesses demandés à la roue pour pouvoir suivre un profil de vitesse en fonction du temps [GUSC05].

La Figure 2.14 schématise les forces appliquées sur un véhicule:

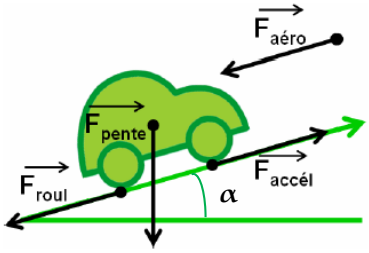


Figure 2.14 : Forces appliquées sur le véhicule [JANI11]

Les forces appliquées sur le véhicule se composent de :

- La force liée à la résistance aérodynamique ;
- La force liée à la résistance au roulement des pneus ;
- La force liée à la pente de la route ;
- La forcé liée à l'accélération du véhicule.

A ces forces s'ajoutent des pertes dans le léchage des freins (qui frottent toujours un peu), les roulements de roues et les joints de cardan qui sont inclus dans le modèle de véhicule. Ces éléments sont représentés sur la Figure 2.15.

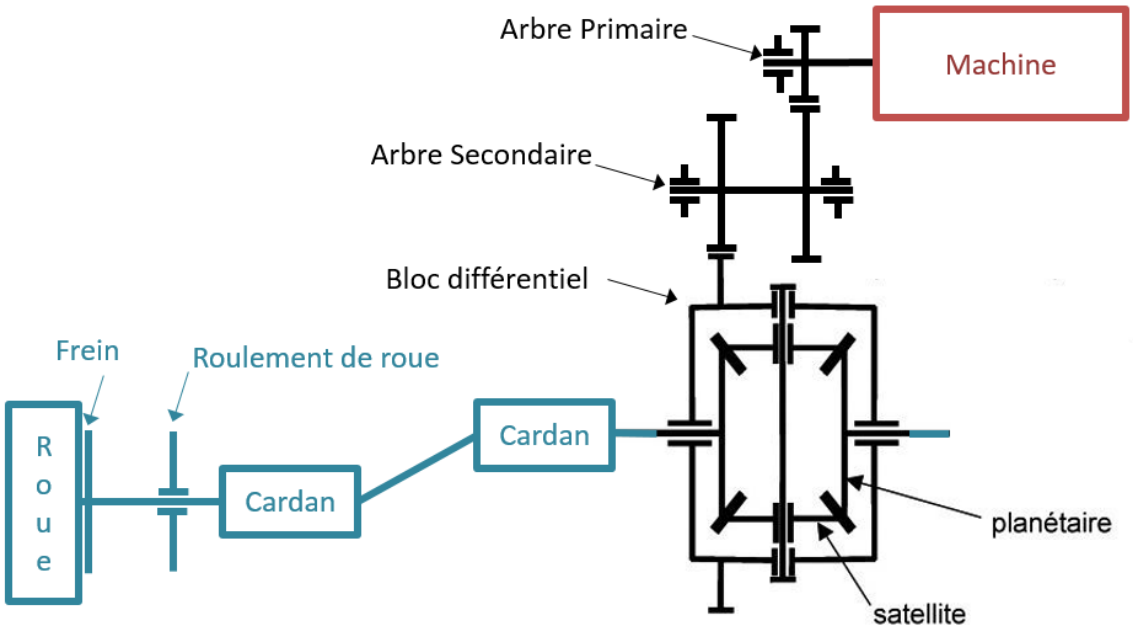


Figure 2.15 : Représentation schématique de la transmission entre la machine et les roues

➢ **Vitesse, couple**

La Figure 2.16 représente un cycle de roulage simple avec la vitesse du véhicule en fonction du temps. Les données d'entrée sont les points qui forment les segments.

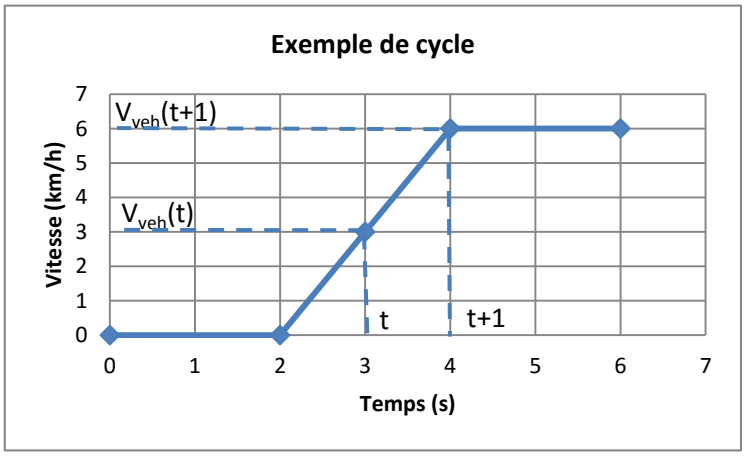


Figure 2.16 : Exemple d'un cycle simple

Des données également nécessaires sont la pente de la route en fonction du temps. A partir de ce cycle, nous obtenons les vitesses et couples à la roue à partir des équations suivantes :

$$\Omega_{trans}(t) = \frac{1}{R_{roue}} . \frac{V_{veh}(t+1) - V_{veh}(t)}{2} = \frac{1}{R_{roue}} . V_{veh_moyen}$$
$$C_{trans}(t) = R_{roue} . \frac{(F_{aéro} + F_{pneu} + F_{pente} + F_{accel} + F_{roul} + F_{frein})}{\eta_{cardan}} \quad (2.1)$$

Avec

R_{roue}: rayon de la roue [m]

V_{veh} : vitesse véhicule [m/s]

V_{veh_moyen}: vitesse véhicule moyenne entre 2 points du cycle [m/s], on prend la moyenne pour pouvoir intégrer l'accélération qui nécessite 2 points (*t* et *t+1*)

Ω_{trans}: vitesse des roues et du bloc différentiel [rad/s]

C_{trans} : couple nécessaire au bloc différentiel [Nm]

$F_{aéro}$: force liée à la résistance aérodynamique [N]

F_{pneu} : force liée à la résistance au roulement des pneus [N]

F_{pente} : force liée à la pente de la route [N]

F_{accel} : force liée à la pente de la route [N]

F_{frein} : force pour le léchage des freins [N]

F_{roul} : force pour les roulements des roues [N]

η_{cardan}: rendement des joints de cardan

Chaque valeur de $[\Omega_{trans}, C_{trans}]$ représente ce qu'on appellera par la suite un point de fonctionnement. Pour un cycle de x points, on aura donc x-1 points de fonctionnement. Les performances que doit respecter le véhicule seront représentées par des cycles élémentaires de 2

points : par exemple si on souhaite qu'un véhicule puisse accélérer de 0 à 100km/h en 10s sous une pente de 1%, on aura les vecteurs suivants :

- $t = [0\ 10]$ s ;
- $V_{veh} = [0\ 100]$ km/h ;
- $p_e = [0.01\ 0.01]$.

Dans la suite du document, les indices temporels (t) ne seront plus précisés pour les points de fonctionnement, sauf pour la force d'accélération.

➢ **Calculs des forces**

- Force aérodynamique

$$F_{aéro} = \frac{1}{2}.\rho(T_{ext}).S_f.C_x.V_{veh_moyen}{}^2 \quad (2.2)$$

Avec

ρ : masse volumique de l'air [kg/m³] recalculée en fonction de la température extérieure T_{ext}

T_{ext} : température de l'air extérieur [°C]

S_f : section frontale du véhicule [m²]

C_x : coefficient de pénétration dans l'air

- Force de résistance au roulement

$$F_{pneu} = CRR(V_{veh}).M_{veh}.g \quad (2.3)$$

Avec

CRR : coefficient de résistance au roulement, qui peut être calculé en incluant l'influence de la pression et de la température des pneus, ainsi que de la vitesse, par des formules empiriques [BOSS14]. Les valeurs utilisées ici proviennent d'essais Renault et dépendent uniquement de la vitesse.

g : accélération de la pesanteur [m/s²]

M_{veh} : masse du véhicule [kg], qui inclue la masse calculée des composants de la chaine de traction

$$M_{veh} = M_{veh_vide} + M_{charge} + M_{trans} + M_{mot} + M_{ond} + M_{batt} \quad (2.4)$$

Avec

M_{veh_vide} : masse du véhicule à vide hors chaine de traction [kg]

M_{charge} : charge du véhicule [kg] (passagers et masse supplémentaire), cette masse peut varier en fonction des points performances (performances à vide et en charge différentes)

M_{trans} : masse de la transmission [kg]

M_{mot} : masse du moteur [kg]

M_{ond} : masse de l'onduleur [kg]

M_{batt} : masse de la batterie [kg]

- Force pour vaincre une pente

$$F_{pente} = M_{veh}.g.\sin(\propto(t)) = M_{veh}.g.p_{e_{moyen}} \quad (2.5)$$

Avec

$\propto$: angle de la pente tel que définie dans la Figure 2.14

p_e : pente moyenne de la route entre 2 points du cycle

- Force liée à l'accélération

$$F_{accel} = \left(M_{veh} + \frac{J_{tot}}{R_{roue}^{\ 2}}\right).\gamma = \left(M_{veh} + \frac{J_{tot}}{R_{roue}^{\ 2}}\right).\frac{V_{veh}(t+1) - V_{veh}(t)}{(t+1) - t} \quad (2.6)$$

Avec

R_{roue}: rayon de la roue [m]

γ : accélération du véhicule [m/s²]

J_{tot}: inerties des pièces tournantes ramenées à la roue [kg.m²]

La part de l'inertie dans la force d'accélération n'est pas négligeable, en particulier l'inertie du moteur qui peut ajouter jusqu'à l'équivalent de 100 kg au véhicule. L'inertie est obtenue par, dans le cas d'un réducteur avec 2 étages de réduction (voir la Figure 2.15) :

$$J_{tot} = n_{roue}.J_{roue} + J_{BD} + J_{AS}.k_{AS/BD}^{\ 2} + (J_{AP} + J_{mot}).k_{AP/BD}^{\ 2} \quad (2.7)$$

Avec

n_{roue} : nombre de roues du véhicule

J_{roue} : inertie d'une roue [kg.m²]

J_{BD} : inertie du bloc différentiel [kg.m²]

J_{AS} : inertie de l'arbre secondaire du réducteur [kg.m²]

J_{AP}: inertie de l'arbre primaire du réducteur [kg.m²]

J_{mot} : inertie du rotor de la machine [kg.m²]

$k_{AS/BD}$: rapport de réduction entre arbre secondaire et bloc différentiel

$k_{AP/BD}$: rapport de réduction entre arbre primaire et bloc différentiel

- Pertes supplémentaires pour les freins, les roulements et les cardans :
  - La proximité entre les disques et les étriers de frein entraine de légers frottements nommés léchage, la force ajoutée est une constante fournie par Renault ;
  - Les roulements des roues ont des frottements internes, la force ajoutée est une constante fournie par Renault ;
  - Un rendement est associé aux joints de cardan, dépendant de l'angle entre la boite et les roues, fourni par Renault également.

2.2.1.1 Bloc véhicule

La Figure 2.17 représente le schéma bloc du modèle de véhicule avec les entrées, les sorties et les données.

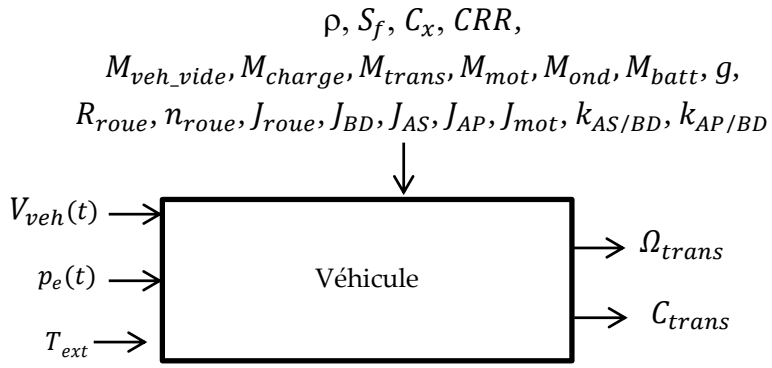


Figure 2.17 : Schéma bloc du modèle de véhicule

Aucune contrainte n'est associée à ce modèle

2.2.2 Modèle de la transmission

Le modèle de la transmission doit permettre d'estimer le couple et la vitesse demandée à la machine. La vitesse moteur est simplement la vitesse roue multipliée par les rapports de réduction. Le couple nécessite de calculer les pertes dans les engrenages. Le choix des modèles utilisés est le suivant :

- Calcul des pertes : les pertes dans une boite de vitesse dépendent fortement des écoulements et sont difficilement modélisables sans faire appel à des modèles de mécaniques des fluides très lourds en temps de calcul [HKNL08]. Avec l'objectif de faire varier seulement les rapports de réduction, nous avons choisi d'utiliser un modèle qui interpole les résultats d'essais réalisés sur un réducteur propre à Renault [CACA14]. Pour obtenir des rapports de réduction supérieurs à 5, deux étages de réduction sont généralement utilisés comme c'est le cas du le Twizy ;
- Influence de la température : elle influe sensiblement sur les pertes de la transmission en particulier au travers de la viscosité de l'huile. Il est intéressant ici de pouvoir estimer l'influence de la température sur les pertes pour obtenir les performances désirées pour le véhicule dans différentes conditions extérieures ;
- Modèle thermique : la thermique n'est pas une contrainte forte pour le réducteur ; avoir un modèle thermique a donc un intérêt limité pour notre étude amont ;
- Modèle vibro-acoustique : l'ensemble machine/réducteur peut engendrer vibrations et bruit qui ne doivent pas dépasser certaines limites. Avec l'hypothèse de modèles électromagnétiques au 1er harmonique, la modélisation de ces vibrations dont la machine est l'origine n'est pas possible. L'intégration de ces phénomènes nécessite des modèles lourds en temps de calcul qui pourront être intégrés avec les stratégies présentées au Chapitre 3.

➢ **Vitesse, couple**

Les relations suivantes permettent de calculer la vitesse et le couple demandé à la machine :

$$\Omega_{mot} = \Omega_{trans} . k_{AP/BD} \tag{2.8}$$

Avec

Ω_{mot} : vitesse de rotation de l'arbre moteur [rad/s]

$k_{AP/BD}$: rapport de réduction entre arbre primaire et bloc différentiel (Figure 2.15)

Le couple et la puissance mécanique demandée au moteur sont calculés par un bilan de puissance:

$$C_{mot} = \frac{C_{trans}}{k_{AS/BD}} + \frac{q_{trans}}{\Omega_{mot}}$$
$$P_{mot_mec} = C_{mot} . \Omega_{mot} \tag{2.9}$$

Avec

q_{trans} : pertes dans la transmission [W]

C_{mot} : couple demandé au moteur [Nm]

P_{mot_mec} : puissance mécanique demandée au moteur [W]

- **Pertes**

Les pertes d'un réducteur peuvent se séparer en :

- Pertes dans les dentures, dépendantes principalement du couple qui résulte du glissement entre les dents et des efforts associés. En première approximation, un étage de dentures a un rendement de 99 % :

$$q_{denture} = \left(1 - 0.99^{nb_{etage}}\right). C_{trans}. \Omega_{trans} \tag{2.10}$$

Avec

$q_{denture}$: pertes dans les dentures [W]

nb_{etage} : nombre d'étages de réduction

- Pertes dues à la trainée principalement dépendantes de la vitesse et de la température, qui incluent les pertes dans les roulements, les pertes aérauliques et les pertes de barbotage avec l'huile. Ces pertes peuvent être mesurées à vide. En première approximation, ces pertes suivent une loi polynomiale d'ordre 2 dont les coefficients seront nommés *a0 a1* et *a2*, en fonction de la vitesse des roues Ω_{trans}. Dans le cas d'un réducteur avec 2 étages de réduction, des essais ont permis d'estimer la répartition des pertes sur les 3 arbres du réducteur :
    - p_{AP} : proportion des pertes sur AP
    - p_{AS} proportion des pertes sur AS
    - p_{BD} : proportion des pertes sur BD

  Pour ne pas avoir 3 coefficients de loi polynomiale pour chaque arbre, il est possible de ramener la vitesse de tous les arbres à celle de l'arbre primaire, en utilisant les rapports de réduction du réducteur testé : $kt_{AS/BD}$ et $kt_{AP/BD}$. On obtient les pertes par trainée $q_{trainee}$ avec la relation suivante :

$$q_{trainee} = a2.\Omega_{trans}{}^2.\left(p_{BD} + p_{AS}.\left(\frac{k_{AS/BD}}{kt_{AS/BD}}\right)^2 + p_{AP}.\left(\frac{k_{AP/BD}}{kt_{AP/BD}}\right)^2\right) + a1.\Omega_{trans}.\left(p_{BD} + p_{AS}.\frac{k_{AS/BD}}{kt_{AS/BD}} + p_{AP}.\frac{k_{AP/BD}}{kt_{AP/BD}}\right) + a0 \quad (2.11)$$

Avec

$q_{trainee}$: pertes dans les dentures [W]

Dans le cas d'un réducteur avec 1 seul étage de réduction, le coefficient p_{AS} sera nul. L'impact de la température sur les pertes par trainée dépend de la vitesse, mais également de la nature du lubrifiant et de son profil de viscosité fonction de la température. En fonction de la viscosité cinématique ν de l'huile utilisée, les pertes par trainée suivent une loi logarithmique

$$q_{trainee}(\nu) = b1.\ln(\nu) + b0 \quad (2.12)$$

Avec

ν : viscosité cinématique de l'huile [m²/s]

Le coefficient $b1$ dépend de la vitesse par une loi linéaire passant par 0 :

$$b1(\Omega_{trans}) = b2.\Omega_{trans} \quad (2.13)$$

A partir des essais, on obtient le coefficient $b2$ qui permettra de retrouver $b1$ puis $b0$ par

$$b0 = q_{trainee}(Tt) - b1.\ln(\nu(Tt)) \quad (2.14)$$

Avec

Tt : température des mesures de pertes par trainée [°C] pour obtenir l'équation (2.11)

On obtient enfin la trainée à la température huile étudiée T_{trans} :

$$q_{trainee}(T_{trans}) = b1(\Omega_{trans}).\ln(\nu(T)) + b0(Tt, \Omega_{trans}) = q_{trainee}(Tt) + b2 \times \Omega_{trans}.(\ln(\nu(T_{trans}) - \ln(\nu(Tt))) \quad (2.15)$$

Avec

T_{trans} : température de la transmission [°C]

La formule utilisée pour obtenir la dépendance de la viscosité à la température est la relation de Walther [SEET06]. A partir de la viscosité cinématique $\nu 1$ et $\nu 2$ à 2 températures données $T1$ et $T2$, on calcule un coefficient $\propto$ qui permet de déduire $\nu(T_{trans})$:

$$\propto (T_{trans}) = \ln(\ln(\nu 1 + 0.7)) + [\ln(\ln(\nu 2 + 0.7)) - \ln(\ln(\nu 1 + 0.7))] .\frac{\ln T1 - \ln T_{trans}}{\ln T1 - \ln T2} \quad (2.16)$$

$$\nu(T_{trans}) = e^{e^{\propto}} - 0.7$$

- Les pertes totales sont la somme des pertes par trainée et par denture

$$q_{trans} = q_{trainee} + q_{denture} \quad (2.17)$$

2.2.2.1 Bloc transmission

La Figure 2.18 représente le schéma bloc du modèle de transmission avec les entrées, les sorties et les données.

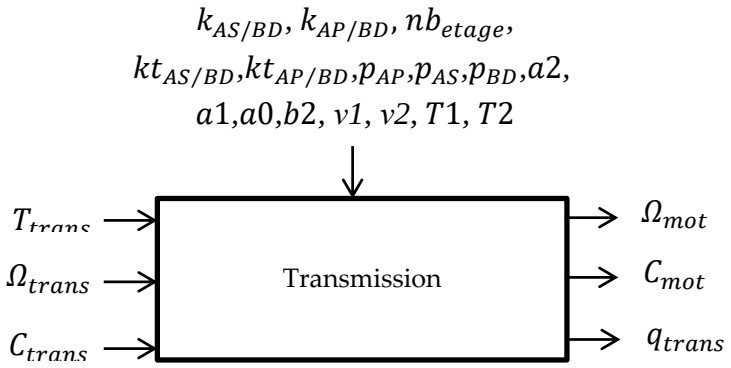


Figure 2.18 : Schéma bloc du modèle de transmission

Dans le cas d'une boite de vitesse, il y aura autant de rapport de réduction qu'il y a de vitesses, en plus de $k_{AS/BD}$. Il n'y a pas de contraintes spécifiques associées au réducteur. Le modèle étant basé sur une interpolation d'essais, il faut s'assurer que la vitesse maximale simulée ne dépasse pas celle des essais.

2.2.2.2 Masse et cout

Les modèles de masse et de cout se basent sur la puissance transitant dans la transmission, en première approximation. Les coefficients a, b, c et d ont été obtenus par des régressions linéaires entre différentes transmissions étudiées chez Renault (Twizy, Zoé et autres projets) :

$$M_{trans} = \left(a.P_{mot_mec_max} + b\right) \times (c\,.nb_{rapport} + d\,) \tag{2.18}$$

Avec

M_{trans} : masse de la transmission [kg]

$nb_{rapport}$: nombre de rapport dans le cas d'une boite de vitesse

$P_{mot_mec_max}$: puissance maximale demandée au réducteur par le cahier des charges [W]. Pour connaitre cette puissance, il faut utiliser le modèle de véhicule ce qui nécessite de connaitre la masse des composants. Pour résoudre cette boucle algébrique, on part d'une masse initiale approximative et itère une ou deux fois pour arriver à une erreur sur la masse réducteur de moins de 1 kg.

Pour le cout, quatre autres coefficients e, f, g et h ont été déterminés :

$$cout_{trans} = \left(e.P_{mot_mec_max} + f\right) \times (g\,.nb_{rapport} + h\,) \tag{2.19}$$

La formule intègre le nombre de rapports dans le cas de l'étude d'une boite de vitesse.

2.2.2.3 Validation sur la plage vitesse/couple

Le modèle de pertes réducteur a été validé en calculant le rendement en fonction de la vitesse véhicule et du couple à la roue. Le résultat de la Figure 2.19 est une cartographie de rendement qui correspond aux données d'essais exploitées pour construire le modèle. Cette validation permet de s'assurer que le comportement du modèle est cohérent sur toute la plage de vitesse et de couple du Twizy.

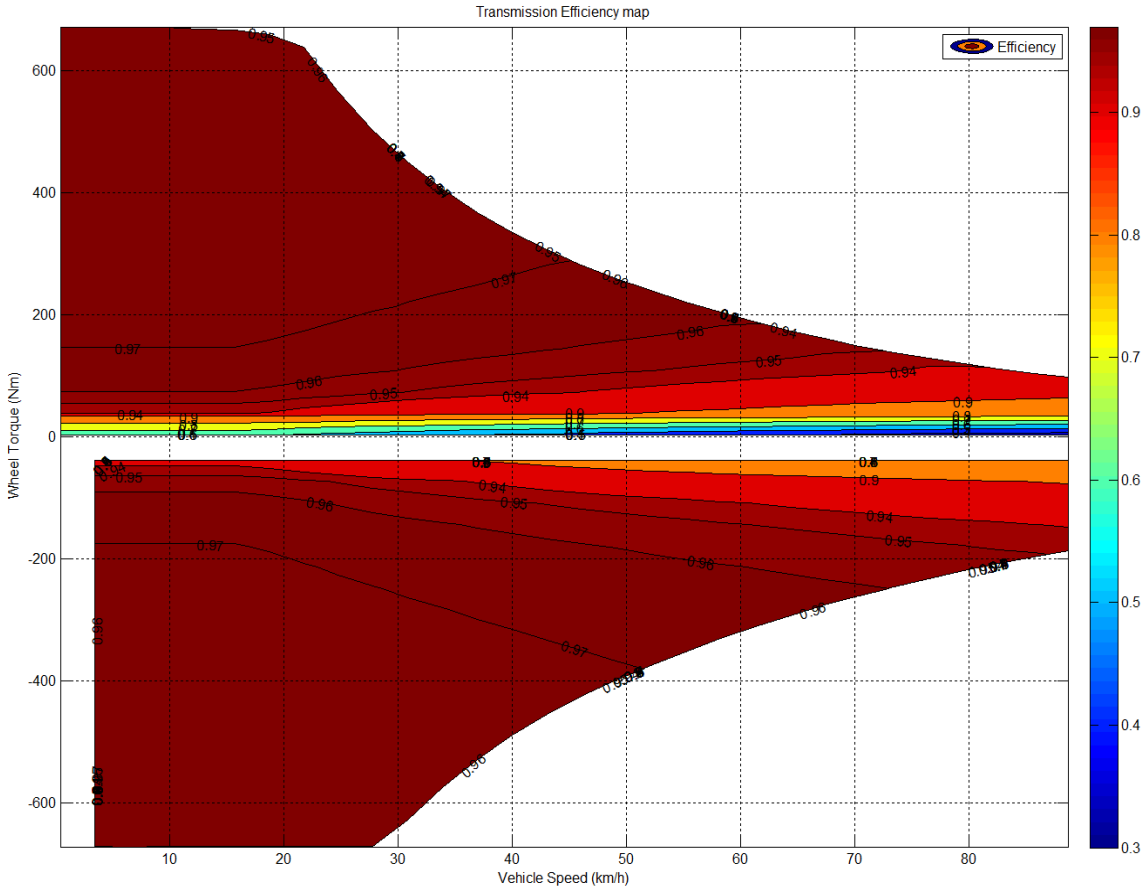


Figure 2.19 : Cartographie de rendement réducteur à $T_{red} = 70\ °C$

Par convention, le couple est positif lorsque le véhicule demande de la puissance et négatif dans les phases de freinage. Lorsque la puissance à récupérer est faible, les pertes de la chaine de traction dépassent la puissance récupérable, d'où la zone sans valeur de rendement. Le rendement est supérieur à 95 % sur une large plage de fonctionnement. Seule la zone à très faible couple a des rendements bas, à cause des pertes à vide.

2.2.3 *Modèle de la machine électrique*

La machine électrique étudiée est une machine asynchrone à cage d'écureuil en aluminium. Le modèle doit permettre d'estimer le courant et la tension demandés à l'onduleur. Le choix des modèles utilisés est le suivant :

- Electromagnétisme / calcul des pertes : la modélisation se base sur un schéma monophasé équivalent avec l'hypothèse que les formes d'ondes sont sinusoïdales, c'est-à-dire avec l'hypothèse d'un modèle au 1er harmonique. L'exactitude de ce modèle dépend fortement de la qualité de l'estimation des inductances et résistances du stator et du rotor de la machine. D'autres modèles analytiques existent comme le modèle de Park, souvent utilisé pour modéliser les machines électriques [BAGH05]. Il est surtout utile pour gérer la commande dynamique que nous ne considérons pas ici, puisque nous étudions uniquement le régime permanent ;
- Contrôle : une loi de contrôle pour ce régime permanent doit être déterminée, et si possible **une loi de contrôle optimale** ;
- Influence de la température : l'échauffement de la machine influence sensiblement sur les pertes. Estimer cette influence est important pour obtenir le courant demandé à l'onduleur ;
- Modèle thermique : la thermique doit être prise en compte, car c'est une contrainte forte de dimensionnement de la machine. Elle sera intégrée avec un modèle à constantes localisées dont les coefficients d'échange avec l'air ambiant seront obtenus à partir de résultats d'essais ;
- Modèle vibro-acoustique : comme pour la transmission, l'hypothèse de modèles électromagnétiques au 1er harmonique ne permet pas la modélisation des vibrations ;
- Résistance mécanique : avec des vitesses de rotation potentiellement élevée, le rotor de la machine peut présenter des risques de rupture mécanique. Bien que la machine asynchrone ne présente pas de risque aux vitesses considérées ici, une contrainte sur la vitesse périphérique du rotor peut être facilement intégrée.

➢ **Courant, tension**

Le courant et la tension demandés par le moteur à l'onduleur sont obtenus par la résolution du circuit équivalent de la Figure 2.20 [MUYE12]. Le circuit est classique pour une machine asynchrone à simple cage, avec des paramètres du schéma qui varient pour intégrer les phénomènes de saturation qui interviennent dans le cas de l'application automobile à vitesse variable.

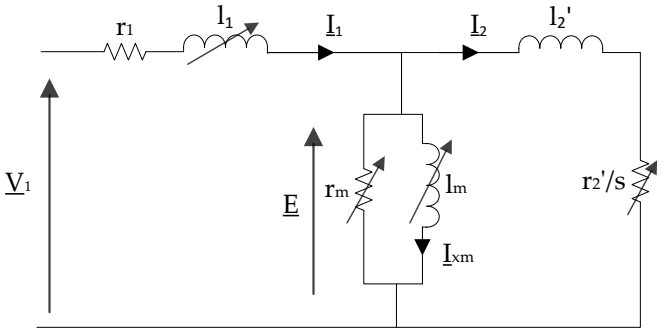


Figure 2.20 : Schéma monophasé équivalent d'une machine asynchrone

Avec

V_1 : tension phase neutre efficace [V]

E : force électromotrice efficace [V]

r_1 : résistance statorique d'une phase [Ω]

l_1 : inductance de fuite statorique d'une phase [Ω]

r_2' : résistance rotorique ramenée au stator d'une phase [Ω]

l_2' : inductance de fuite rotorique ramenée au stator d'une phase [Ω]
r_m : résistance pertes fer d'une phase [Ω]
l_m : inductance magnétisante d'une phase [Ω]
s : glissement (*slip* en anglais)
I_1 : courant statorique efficace [A]
I_2 : courant efficace dans les barres du rotor [A]
I_{xm} : courant efficace magnétisant [A]

Le glissement s est calculé par:

$$s = \frac{2.\pi.f - p\,.\Omega_{mot}}{2.\pi.f} \tag{2.20}$$

Avec
p : nombre de paires de pôles
f : fréquence des courants statoriques [Hz]
Ω_{mot} : vitesse de rotation du rotor [rad/s]

Si E, f, et Ω_{mot} sont connus, le circuit peut être résolu [MUYE12]. Les sorties sont V1, le couple mécanique C_{mot}, le courant I_1, les pertes et le facteur de puissance $\cos(\varphi)$. Si V1 était choisi en entrée à la place de E, le schéma ne pourrait pas être résolu à moins d'effectuer une simplification qui consiste à considérer la chute de tension entre V1 et E constante et connue [BOOL97]. Cependant, en régime de fonctionnement variable, la chute de tension entre V1 et E ne peut pas être négligée, en particulier aux faibles vitesses. Nous conserverons donc E en entrée du modèle.

- **Couple**

Le couple électromagnétique C_{em} est obtenu par la relation classique :

$$C_{em} = \frac{n_{ph}\,.p.E^2}{2.\pi.f}\,.\frac{\frac{r_2'}{s}}{\frac{r_2'^2}{s} + (l'_2.2.\pi.f)^2} \tag{2.21}$$

Avec
C_{em} : couple électromagnétique [Nm]
n_{ph} : nombre de phases

C_{em} diffère du couple mécanique C_{mot} par les pertes mécaniques de la machine :

$$C_{mot} = C_{em} - \frac{q_{aero} + q_{roul}}{\Omega_{mot}} \tag{2.22}$$

Avec
q_{aero} : pertes aérauliques du rotor [W]
q_{roul} : pertes dans les roulements [W]

C_{mot} est donc ici une sortie du modèle alors que le modèle de réducteur fournit un couple demandé à la machine. La loi de contrôle permettra de s'assurer que le couple fourni par la machine est égal au couple demandé (section 2.2.3.2).

- **Saturation**

La saturation est prise en compte à travers les inductances lm l1, grâce à un coefficient de saturation Ks [BOTS09][PYJH09][FOST07] :

$$l_m = \frac{l_{m0}}{Ks} \qquad l_1 = l_{11} + l_{12} + \frac{l_{13}}{Ks} \tag{2.23}$$

Avec

l_{m0} : inductance magnétisante sans saturation [H]

l_{11} : inductance de fuite encoche stator [H]

l_{12} : inductance de fuite des têtes de bobine [H]

l_{13}: inductance de fuite zig-zag sans saturation [H], seule cette inductance est divisée par le coefficient de saturation, car elle représente les fuites des sommets des dents en fer où le flux traverse deux fois l'entrefer pour former un flux résultant qui semble « zig zaguer » du stator au rotor.

Les détails du calcul des coefficients du modèle sont donnés en annexe E.1 de [SAMA13].

Le coefficient Ks est calculé en divisant la machine en cinq parties : entrefer, dents et culasse rotor et stator. Les inductions maximum B sont calculées dans chaque partie puis les forces magnétomotrices F sont estimées à partir d'un faisceau de courbe $B(H)$ pour différentes fréquences provenant du fabricant de la tôle magnétique considérée. Ces données sont inversées pour calculer le champ magnétique $H(B, f)$. Ks est donné par :

$$Ks = \frac{2\,F_g + 2\,F_{st} + 2\,F_{rt} + F_{sy} + F_{ry}}{2\,F_g} \qquad F_g = \frac{B_g . K_c . \varepsilon}{\mu_0} \qquad F_i = H_i\left(B_i, f_j\right). l_i \tag{2.24}$$

Avec :

F_g : force magnétomotrice dans l'entrefer [A]

K_c coefficient de Carter

ε: épaisseur de l'entrefer [m]

μ_0 : perméabilité magnétique du vide [T.m/A]

F_i : forces magnétomotrices de l'élément i [A]

H_i : champ magnétique de l'élément i [A/m]

B_i : induction maximum dans l'élément i [T]

f_j : fréquence statorique ou rotorique [Hz]
l_i : longueur moyenne de la ligne de flux de l'élément i [m]
$i \in$ [st : dents stator, rt : dents rotor, sy : culasse stator, ry: culasse rotor]

Le coefficient de saturation est toujours supérieur à 1. Les lignes de flux moyennes sont calculées telles que représentées sur la Figure 2.21 [BESN08]:

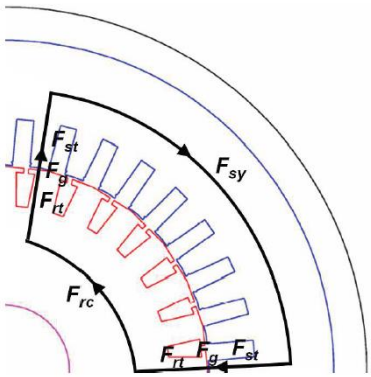


Figure 2.21 : Ligne de flux moyenne pour le calcul du coefficient de saturation [BESN08]

Les inductions sont calculées dans les différentes parties de la machine à partir du flux Φ à partir des relations suivantes [LICH67][PYJH09] :

$$\Phi = \frac{E}{\pi\sqrt{2}\,.N_{sp}.K_b\,.f}$$

$$B_g = \Phi.\frac{p}{d_g\,.l_{fer}} \qquad (2.25)$$

$$B_{st} = B_g\,.\frac{\tau_{st}}{k_{Fe}.l_{st}}$$

$$B_{sy} = \frac{\Phi}{2}\,.\frac{1}{k_{Fe}\,.h_{\,sy}.l_{fer}}$$

Φ: flux moyen par pole
K_b : coefficient de bobinage
N_{sp} : nombre de spires en série par phase
l_{fer} : longueur de fer [m]
d_g : diamètre moyen de l'entrefer [m]
k_{Fe} : coefficient de foisonnement magnétique du fer
l_{st}: largeur moyenne dent stator [m]
τ_{st} : pas dentaire stator [m]
$h_{\,sy}$: épaisseur de la culasse stator [m]

Les inductions B_{ry} et B_{rt} pour le rotor sont calculées avec des formulations similaires.

- **Pertes**

Les pertes dans la machine se décomposent en pertes fer, pertes Joule au stator et au rotor, pertes aérauliques et pertes dans les roulements, et pertes additionnelles

- Les pertes fer q_{fer} sont calculées avant la résolution du schéma équivalent pour trouver la résistance r_m. Le calcul dissocie les pertes par hystérésis et les pertes par courant de Foucault dans chacune des quatre parties (dents et culasse rotor et stator), en fonction des inductions B_i (équations (2.25)) et fréquences f_i [KIMA96]. Les formules sont données en annexe E.1 de [SAMA13]. Grâce à ces pertes, on déduit simplement la valeur de la résistance magnétisante :

$$r_m = \frac{n_{ph} \cdot E^2}{\sum_i q_{fer_i}(B_i, f_i)} \tag{2.26}$$

Avec

q_{fer} : pertes fer dans les différentes parties de la machine [W]

- Les pertes Joule q_{sj} et q_{rj} sont calculées au stator et au rotor avec des résistances qui varient en fonction de la température du bobinage T_{cu} et des barres d'aluminium T_{alu}

$$\begin{aligned} q_{sj} &= n_{ph}.r_1(T_{cu}).{I_1}^2 \\ q_{rj} &= n_{ph}.r_2'(T_{alu}).{I_2}^2 \end{aligned} \tag{2.27}$$

Avec

q_{sj} : pertes Joules au stator [W]

q_{rj} : pertes Joules au rotor [W]

T_{cu} : température du bobinage en cuivre [°C]

T_{alu} : température de la cage en aluminium [°C]

- Des pertes additionnelles sont ajoutées comme un pourcentage de la puissance demandée pour prendre en compte les phénomènes non modélisés comme les pertes dans le cuivre par courants induits (pertes AC) :

$$q_{add} = k_{add}.P_{mot_mec} \tag{2.28}$$

Avec

q_{add} : pertes additionnelles [W]

k_{add} : proportion de pertes additionnelles

- Les pertes mécaniques, dépendantes de la vitesse de rotation, sont ajoutées au couple demandé à la machine. Ces pertes sont divisées en pertes aérauliques et pertes dans les roulements. Les pertes aérauliques sont calculées par la relation suivante [VRAN68] :

$$q_{aero} = K_{sa}.C_f.\pi.\rho_g(T_g).{\Omega_{mot}}^3.{r_{r_ext}}^4.L_{rot} \tag{2.29}$$

Avec

q_{aero} : pertes aérauliques du rotor [W]

ρ_g: masse volumique de l'air de l'entrefer [kg/m3] recalculée en fonction de la température de l'entrefer T_g

T_g: température de l'entrefer [°C]

r_{r_ext} : rayon extérieur du rotor [m]

L_{rot} : longueur du rotor [m] (longueur de fer + anneaux)

K_{sa}: coefficient de saillance (voir [VRAN68])

C_f : coefficient de frottement dépendant du nombre de Reynolds (voir [VRAN68])

Les pertes dans les roulements q_{roul} sont calculées par la formule empirique fournie par Renault, avec une dépendance à la température qui sera prise égale à la température de l'arbre du rotor (T8 sur la Figure 2.23)

- La somme des pertes est donc :

$$q_{mot} = q_{sj} + q_{rj} + \sum_i q_{fer_i}(B_i, f_i) + q_{add} + q_{aero} + q_{roul}$$

➢ **Résumé**

Le schéma de la Figure 2.22 résume les étapes de calcul du modèle électromagnétique :

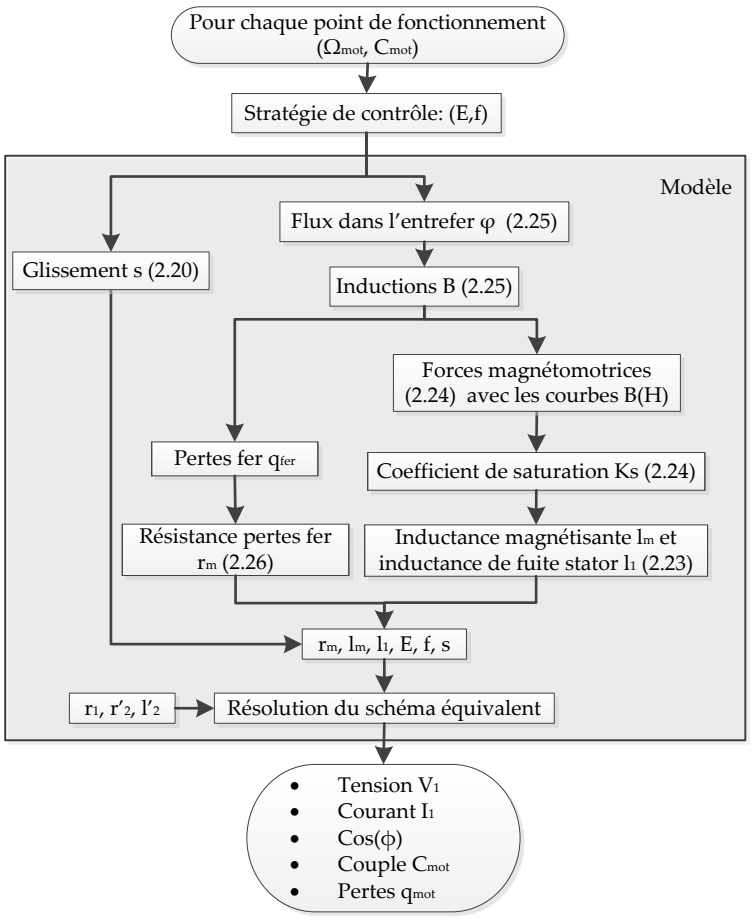


Figure 2.22 : Schéma descriptif du modèle de machine asynchrone

Les tensions U_{mot} et courants I_{mot} transférés au modèle d'onduleur sont obtenus à partir de V_1 et I_1 en fonction du couplage triangle ou étoile de la machine.

2.2.3.1 Modèle thermique

Le modèle thermique est construit à partir d'un réseau de résistances thermiques inspiré de [MERT91], [BCLP03] et [KREU08]. Il permet de faire des simulations en régime permanent ou transitoire. Ce type de modèle est valide lorsqu'il a au préalable été recalé par rapport à des essais. Les coefficients d'échange thermique ont donc été adaptés à la machine du Twizy.

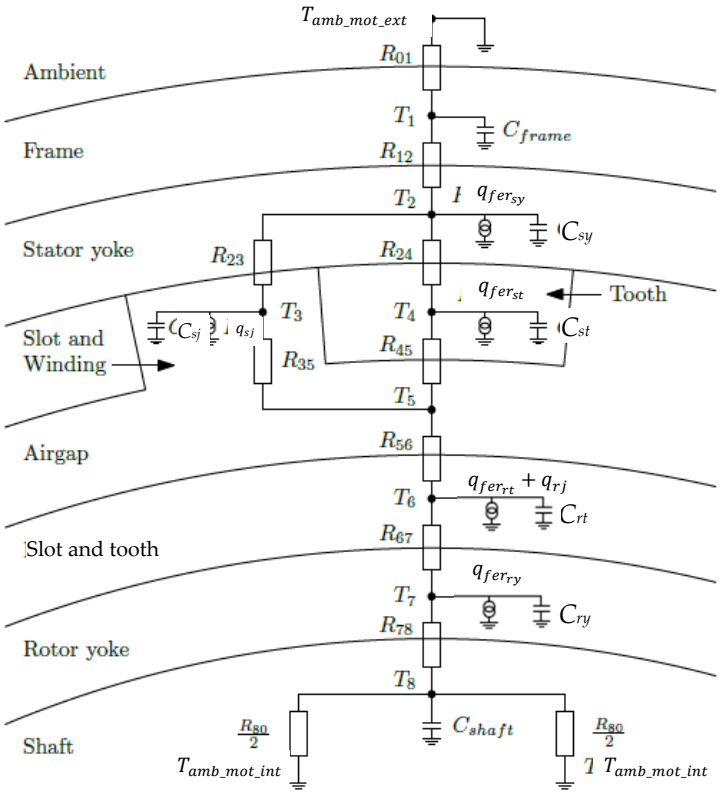


Figure 2.23 : Schéma du modèle thermique [KREU08] adapté

Avec

$T_{amb_mot_ext}$: température du fluide de refroidissement coté carter [°C]

$T_{amb_mot_int}$: température du fluide de refroidissement coté arbre [°C]

R_{xy} : résistance thermique de l'élément xy [K/W] $xy \in$ {01,12,23,24,45,56,67,78}

C_i: capacité thermique de l'élément i [J/K] $i \in$ {frame,sy,sj,st,rt,ry,shaft}, la capacité thermique est calculée en fonction de la capacité thermique massique de chaque matériau et de la masse des éléments de la machine correspondant

h_{mot} : coefficient de convection thermique [W/(m².K)], non visible sur la figure, il est recalé en fonction de résultat d'essais sur la machine du Twizy

La Figure 2.23 décrit le schéma du réseau utilisé. La machine est divisée en 8 nœuds : milieu ambiant, carter, culasse stator, dents stator et bobinage, entrefer, dents et barres rotor, culasse rotor et arbre. Les détails du modèle sont donnés en annexe B.6 de [KREU08]. La température des milieux ambiants extérieurs et intérieurs peut varier en fonction du type de refroidissement. Dans le cas de la machine du Twizy refroidi par air, il s'agit de la température sous capot dans les 2 cas.

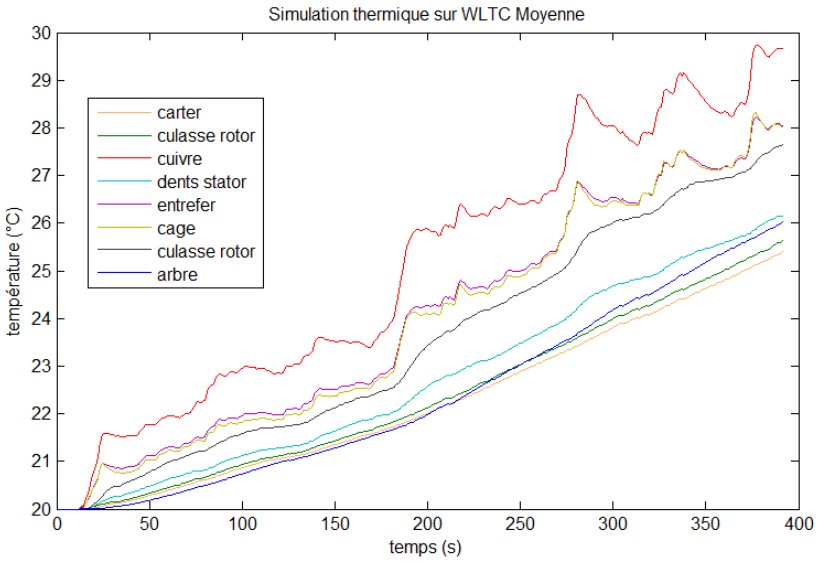


Figure 2.24 : Exemple de résultat transitoire sur le cycle WLTC moyen

La Figure 2.24 est un exemple de simulation transitoire sur le cycle WLTC section « moyen » avec une température initiale et ambiante de 20 °C. Dans le cas d'une simulation en régime permanent, le modèle thermique a en entrée les pertes de la machine qui nécessitent de connaitre les températures machines pour être calculées, notamment à cause des résistances qui dépendent de la température. Dans ce cas, une boucle de 2 ou 3 itérations avec une méthode de point fixe permet d'obtenir une erreur sur la température de moins de 1 °C. L'ensemble de ces températures sera regroupé sous le nom T_{mot}.

2.2.3.2 Contrôle

Une stratégie de contrôle est nécessaire pour obtenir le couple de sortie égal au couple du point de fonctionnement désiré, en déterminant les E et f adéquats. Pour la machine asynchrone, plusieurs jeux de valeurs (E,f) peuvent donner le même point de fonctionnement (couple, vitesse rotor) [CHEN92].

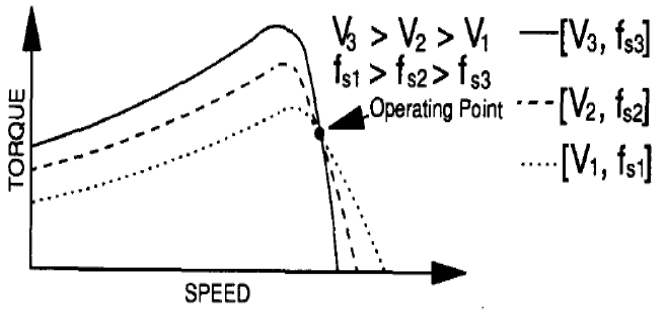


Figure 2.25 : Plusieurs tensions/fréquences pour un même point de fonctionnement [CHEN92]

Le terme « contrôle » de la machine représente ici le choix de (E,f). Pour un point de fonctionnement Ω_{mot}, C_{mot} et un f fixé, il n'y a qu'un seul E possible. Les formules (2.21) et (2.22) peuvent être réécrites pour obtenir ce E, avant même d'avoir résolu le schéma équivalent :

$$C_{em} = C_{mot} + \frac{q_{aero} + q_{roul}}{\Omega_{mot}}$$
$$E(C_{em}, \Omega_{mot}, f) = \sqrt{\frac{C_{em}.(2.\pi.f)^2}{n_{ph}.p}.\frac{{r'_2}^2 + {L'_2}^2.(2.\pi.f - \Omega_{mot})^2}{2.\pi.f - \Omega_{mot}}} \quad (2.30)$$

Une méthode usuelle pour obtenir un contrôle est de garder le flux constant, c'est-à-dire le ratio E/f constant. Mais comme E ne peut pas être directement contrôlé, la simplification consistant à garder V1/f constant est souvent effectuée [THSA09]. Cette hypothèse est valide si la différence de tension entre V1 et E est faible par rapport à E. Toutefois, garder le flux constant n'est pas optimal en termes de pertes pour les points de fonctionnement à faible charge. Pour obtenir de meilleures performances en régime variable, le flux doit être optimisé à l'aide d'un algorithme d'optimisation [CGHJ13]. Cette optimisation doit également respecter les contraintes des composants.

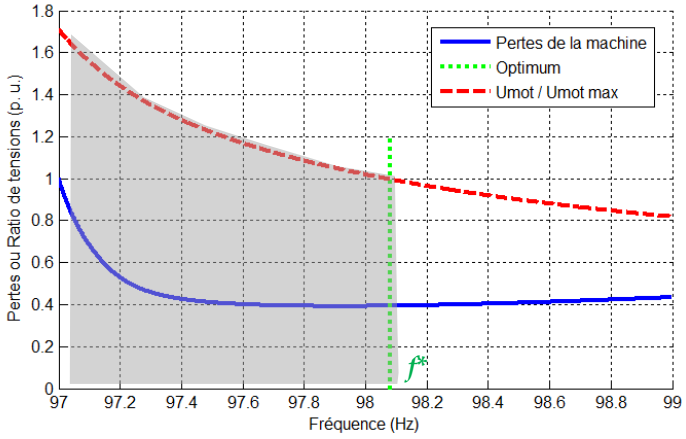


Figure 2.26 : Exemple de minimisation des pertes sous contraintes de tension maximum pour un point de fonctionnement

Sur la Figure 2.26, la fréquence optimum f* est celle qui minimise les pertes sans dépasser la tension maximale U_{mot_max}. L'optimisation du contrôle sera détaillée au Chapitre 3.

2.2.3.3 Blocs machine

La Figure 2.27 représente le schéma bloc du modèle de machine avec les entrées, les sorties et les données.

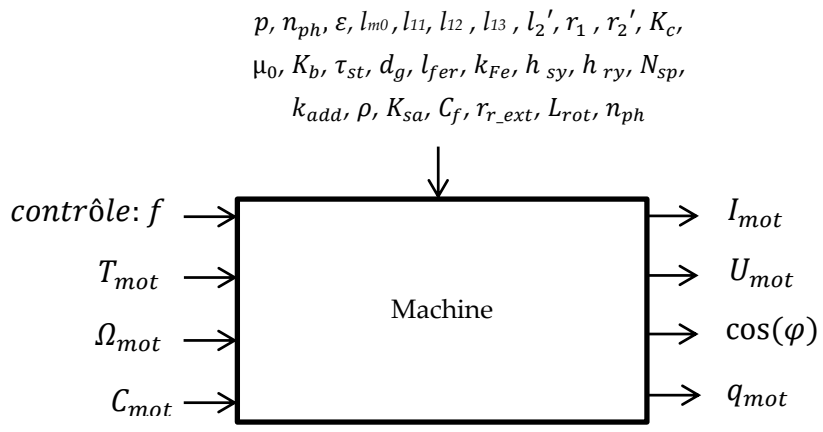


Figure 2.27 : Schéma bloc du modèle de machine

Les données du bloc telles que les inductances ou les coefficients proviennent de calculs, il ne s'agit donc pas ici de la liste exhaustive des données géométriques du modèle. La Figure 2.28 représente le schéma bloc du modèle de machine avec les entrées, les sorties et les données.

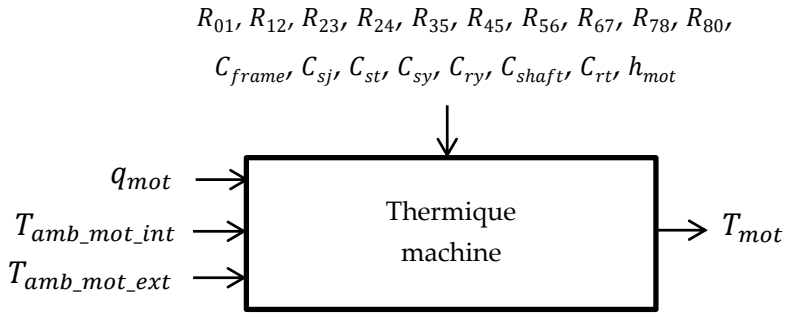


Figure 2.28 : Schéma bloc du modèle thermique de la machine

Pour ce bloc également, les résistances et capacités proviennent de calculs à partir des données géométriques de la machine. Les données de la machine non représentées sur ces schémas blocs sont les suivantes :

- Topologie : nombre d'encoches rotor et stator, nombre de pôles, nombre de phases ;
- Longueur de la machine, épaisseur de l'entrefer ;
- Dimensions des tôles : diamètre de l'arbre, hauteur des culasses, hauteurs et largeurs des dents, hauteurs d'isthmes d'encoche et de clavette, ouvertures d'encoches ;
- Qualité des tôles : épaisseur, courbes B(H), pertes massiques, foisonnement magnétique ;
- Dimensions des anneaux du rotor : hauteur, largeur ;
- Bobinage : nombre de spires, nombre de fils élémentaires, nombre de voies en parallèle, coefficient de remplissage d'encoche, couplage (triangle/étoile), épaisseur d'isolation du fil ;
- Thermique : coefficients de conductions des matériaux et coefficient de convection avec le milieu ambiant (ou le fluide de refroidissement) pour calculer les résistances thermiques ; épaisseur des isolants.

Un ensemble de contraintes doit être respecté pour chaque point de fonctionnement :

- La tension U_{mot} ne doit pas dépasser la tension U_{mot_max} disponible en sortie de l'onduleur ;
- La température dans les différents matériaux de la machine est limitée ;
- Les densités de courant surfaciques et linéiques dans le cuivre et les barres d'aluminium sont limitées par des règles métiers. Bien que ces contraintes proviennent de limites sur les températures, elles permettent de fixer des ordres de grandeur raisonnables pour les échauffements du bobinage ;
- La vitesse périphérique du rotor est limitée pour ne pas dépasser la résistance mécanique. Cette vérification est faite une seule fois pour le point à vitesse maximale sans appel au modèle électromagnétique.

2.2.3.4 Masse et cout

La masse de la machine est obtenue à partir des dimensions des tôles, du bobinage et de la masse volumique des matériaux.

$$\mathrm{M_{mot}} = \sum_{i=materiaux} V_i . \rho_i \tag{2.31}$$

Avec

$\mathrm{M_{mot}}$: masse de la machine [kg]

V_i : volume du matériau i [m³]

ρ_i : masse volumique du matériau i [m³/kg]

Le modèle de cout de la machine utilise les couts au kg de chaque matériau et intègre une part proportionnelle et fixe pour la fabrication:

$$\mathrm{cout_{mot}} = a + b . \sum_{i=materiaux} M_i . cout_i \tag{2.32}$$

Avec :

a : part fixe pour la fabrication

b : part variable pour la fabrication

M_i : masse du matériau i [kg]

$cout_i$: cout massique du matériau i [€/kg]

2.2.3.5 Validation éléments finis

Le modèle a été évalué sur quelques points de fonctionnement pour le comparer avec d'autres modèles : un modèle éléments finis (logiciel Maxwell®), et un modèle analytique commercial (outil RMxprt du logiciel Maxwell®). Le modèle a également été validé sur un banc d'essai mis en place au laboratoire. Cette partie expérimentale sera détaillée au paragraphe 4.4.2.

La comparaison des modèles donne des écarts inférieurs à 5% sur le couple et le courant pour les trois points de fonctionnement testés entre le modèle développé et le modèle éléments finis. On

définit Ω_{mot_max} comme la vitesse maximale de rotation de la machine du Twizy et C_{mot_max} le couple maximal. Le Tableau 2.2 présente les écarts obtenus entre les modèles.

Tableau 2.2 : Comparaison couple et courant sur 3 points de fonctionnement

Vitesse	Couple	Sortie étudiée	Ecart avec RMxprt (%)	Ecart avec Maxwell (%)
1/7 Ω_{mot_max}	~1/7 C_{mot_max}	Couple	1	1
		Courant	6	2
2/7 Ω_{mot_max}	~6/7 C_{mot_max}	Couple	1	-0.3
		Courant	5.5	2.5
6/7 Ω_{mot_max}	~2/7 C_{mot_max}	Couple	-1	-2.5
		Courant	5	1

2.2.3.6 Validation sur la plage vitesse/couple

Le modèle de machine a été vérifié sur toute la plage de fonctionnement en calculant le rendement en fonction de la vitesse véhicule et du couple à la roue (Figure 2.29).

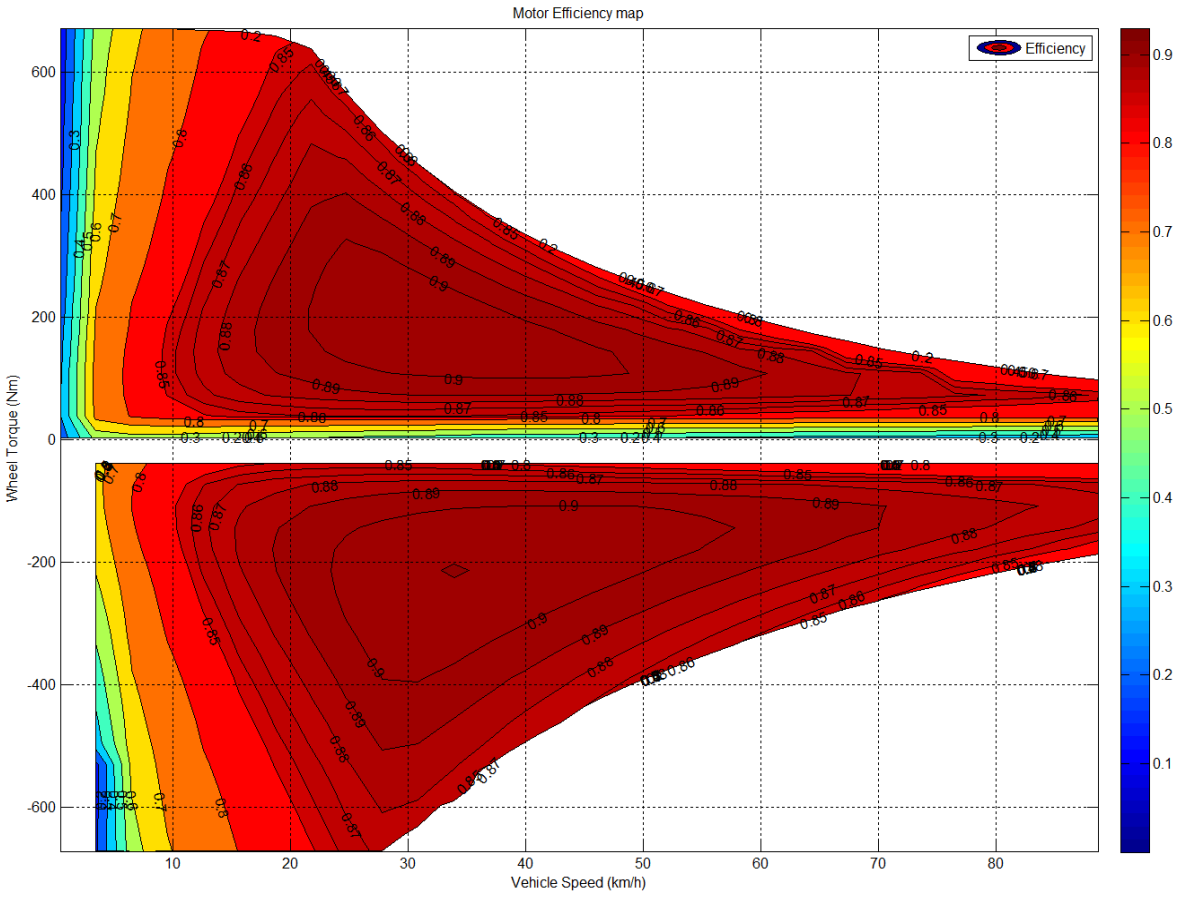


Figure 2.29 : Cartographie de rendement moteur à $T_{mot} = 70\ °C$, $SOC = 40\ \%$ et $T_{batt} = 20\ °C$

Les résultats sont cohérents sur l'ensemble de la cartographie. La zone de meilleur rendement est à 90 %, caractéristique d'une machine asynchrone de cette puissance. La tension à laquelle est

calculée cette cartographie dépend de la tension disponible à la batterie qui dépend elle-même de son état de charge, de sa température, et du courant demandé (voir section 2.2.5). Comme le courant demandé varie pour chaque point de fonctionnement, la tension de la cartographie n'est pas unique.

2.2.4 Modèle de l'onduleur

Le modèle d'onduleur permet de convertir les variables électriques du continu à l'alternatif triphasé et vice versa, afin d'estimer le courant demandé à la batterie. Le choix des modèles utilisés est le suivant :

- Calcul des pertes : les modèles analytiques permettent d'estimer avec suffisamment de précision les pertes des MOSFET [JAWC11][GRPÜ06] ;
- Influence de la température : la température influence sensiblement les résistances sur les pertes. Estimer cette influence est important pour obtenir le courant demandé à l'onduleur ;
- Modèle thermique : la thermique est une contrainte forte de dimensionnement pour l'onduleur. Elle sera intégrée avec un modèle en régime permanent ;
- Modèle vibro-acoustique : l'onduleur ne présente pas de risque vibro-acoustique.

➢ **Courant, tension**

La conversion du courant machine vers le courant batterie est faite par un bilan de puissance qui inclue les pertes de l'onduleur, ainsi que la puissance nécessaire pour faire fonctionner les auxiliaires :

$$I_{batt} = \frac{I_{mot}.U_{mot}.\cos(\varphi) + q_{ond} + \frac{P_{aux}}{\eta_{DC/DC}}}{U_{batt}} \tag{2.33}$$

Avec

I_{batt} : courant batterie [A]
U_{batt} : tension batterie [V]
q_{ond} : pertes dans l'onduleur [W]
P_{aux} : puissance absorbée par les auxiliaires [W]
$\eta_{DC/DC}$: rendement du convertisseur DC/DC, valeur fixe

La conversion de la tension batterie vers la tension efficace maximum disponible au moteur est donnée par :

$$U_{mot_max} = U_{batt}.r_{mod} \tag{2.34}$$

Avec

U_{mot_max} : tension efficace maximale disponible à la machine [V]
r_{mod} : rapport de modulation

Le rapport r_{mod} peut varier en fonction du type de commande MLI. Une valeur classique pour obtenir des formes d'ondes sinusoïdales est $r_{mod} = \frac{1}{2\sqrt{2}}$. Augmenter r_{mod} permettrait d'avoir plus de tension disponible pour la machine électrique, mais dégrade les formes d'ondes qui se chargent en harmoniques. Notre modèle au 1er harmonique ne permet pas d'estimer l'impact de ce rapport.

➢ **Pertes dans l'onduleur**

Les pertes dissipées dans un MOSFET sont divisées en pertes par conduction par commutation dans les transistors et les diodes [JAWC11][GRPÜ06].

- Les pertes par conduction dans les transistors sont estimées par :

$$q_{cond}^{T} = R_{DSON}.{I_T}^2$$

$$I_T = \sqrt{2}.\frac{I_{mot}}{n_{MOS}}.\sqrt{\frac{1}{8}+\frac{f_{mod}.\cos(\varphi)}{3\pi}} \quad (2.35)$$

Avec

q_{cond} :	pertes par conduction dans un MOSFET [W]
I_T :	courant efficace qui traverse le MOSFET à l'état passant [A]
R_{DSON} :	résistance interne du transistor MOSFET en conduction [Ω]
f_{mod} :	facteur de modulation ($0 < f_{mod} < 1$)
n_{MOS}:	nombre de MOSFET en parallèle dans chaque branche

Le calcul de f_{mod} nécessite de connaitre la tension batterie qui ne sera connue qu'une fois le modèle batterie simulé. Pour résoudre cette boucle, une tension initiale est donc calculée, puis 1 ou 2 itérations des modèles onduleur et batterie suffisent à avoir une précision suffisante pour sur tension batterie, dans le cas de la simulation d'un point de fonctionnement unique plutôt qu'un cycle.

$$f_{mod} = \frac{U_{mot}}{U_{mot_max}} = \frac{U_{mot}}{r_{mod}.U_{batt}} \quad (2.36)$$

Le calcul de la résistance R_{DSON} dépend de la température de jonction T_j (Figure 2.30).

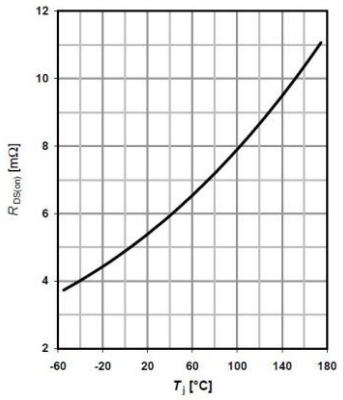


Figure 2.30 : Exemple de variation de la résistance R_{DSON} avec la température d'une fiche constructeur

Cette variation est intégrée dans le modèle à partir d'un point de référence [R_{DSON_ref}, T_{j_ref}] relevés sur la fiche constructeur à partir de la loi suivante [SARR12]:

$$R_{DSON}(T_j) = R_{DSON_ref} . (\frac{T_j}{T_{j_ref}})^{\beta} \quad (2.37)$$

Avec

β : un coefficient égal à 1.5 pour les MOSFET

R_{DSON_ref} : résistance interne du transistor MOSFET en conduction [Ω], relevé sur la fiche constructeur

T_{j_ref} : température de jonction à laquelle a été relevé R_{DSON_ref} [K], relevé sur la fiche constructeur

T_j : température de jonction [K]

- Les pertes par conduction dans les diodes sont estimées par :

$$q_{cond}^{D} = U_{D0} . I_{Dm} + R_D . {I_D}^2 \quad (2.38)$$

Avec

q_{cond}^{D} : pertes par conduction dans une diode [W]

U_{D0} : tension à courant nul à l'état passant [V] , obtenu par la fiche constructeur

I_{Dm} : courant moyen qui traverse la diode [A]

R_D : résistance de la diode [Ω], obtenue par la fiche constructeur

I_D : courant efficace qui traverse une diode [A]

Les courants sont donnés par :

$$I_D = \sqrt{2} . \frac{I_{mot}}{n_{MOS}} . \sqrt{\frac{1}{8} - \frac{f_{mod} . \cos(\varphi)}{3\pi}}$$

$$I_{Dm} = \sqrt{2} . \frac{I_{mot}}{n_{MOS}} . \sqrt{\frac{1}{2.\pi} - \frac{f_{mod} . \cos(\varphi)}{8}} \quad (2.39)$$

- Les pertes par commutation dans les transistors sont estimées par :

$$q_{com}^{T} = \frac{1}{2} . U_{batt} . \frac{I_{mot}}{n_{MOS}} . (Tc_{ON} + Tc_{OFF}) . f_{com} \quad (2.40)$$

Avec :

q_{com}^{T}: pertes par commutation dans un MOSFET [W]

f_{com} : fréquence de commutation [Hz]

Tc_{ON} temps que met le transistor à se fermer [s], obtenu par la fiche constructeur

Tc_{OFF}: temps que met le transistor à s'ouvrir [s], obtenu par la fiche constructeur

- Les pertes par commutation dans les diodes sont estimées par :

$$q_{com}^{D} = Q_{rr}.U_{batt}.f_{com} \tag{2.41}$$

Avec :

q_{com}^{D} : pertes par commutation dans une diode [W]

Q_{rr} : énergie de recouvrement de la diode [C], obtenu par la fiche constructeur

- Le total des pertes est les sommes des pertes par conduction et commutations pour chaque bras de l'onduleur

$$q_{ond} = (q_{cond}^{T} + q_{cond}^{D} + q_{com}^{T} + q_{com}^{D}).n_{MOS}.n_{ph} \tag{2.42}$$

Avec

q_{ond} : pertes dans l'onduleur [W]

➢ **Puissance absorbée par les auxiliaires**

Les auxiliaires ou accessoires tels que climatisation, phares, multimédia ou pompes consomment un courant sur la batterie 14 V. Le réseau 14 V est alimenté par la batterie de traction (~52 V sur le Twizy) par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC. Un modèle précis de ce réseau n'est pas requis pour répondre à nos objectifs. La puissance tirée à la batterie de traction sera donc choisie à une valeur représentative en fonction des cas étudiés.

2.2.4.1 Modèle thermique

Un modèle thermique en régime permanent est intégré pour estimer la température de jonction, basé sur la loi d'Ohm thermique :

$$T_j = T_{amb_ond} + (R_{THJ} + R_{THP} + R_{THR}).q_{ond} \tag{2.43}$$

Avec :

R_{THJ}: résistance thermique de la jonction du composant [K/W]

R_{THP}: résistance thermique du PCB (Printed Circuit Board) [K/W]

R_{THR}: résistance thermique du dissipateur [K/W]

T_{amb_ond} : température du fluide de refroidissement [°C], pour l'onduleur du Twizy refroidi par air, il s'agit de la température sous capot

Pour l'homogénéité des notations, nous utiliserons la notation T_{ond} à la place de T_j dans la suite du document. Les limites usuelles à le ne pas dépasser pour la température de jonction sont de l'ordre de 150 à 175 °C. Les différentes résistances sont obtenues à partir des données constructeurs. Le modèle thermique crée une boucle algébrique : il faut connaitre la température pour la calculer. Deux à trois itérations suffisent à obtenir un écart de moins de 1 °C sur la boucle.

2.2.4.2 Blocs onduleur

La Figure 2.31 représente le schéma bloc du modèle de l'onduleur avec les entrées, les sorties et les données.

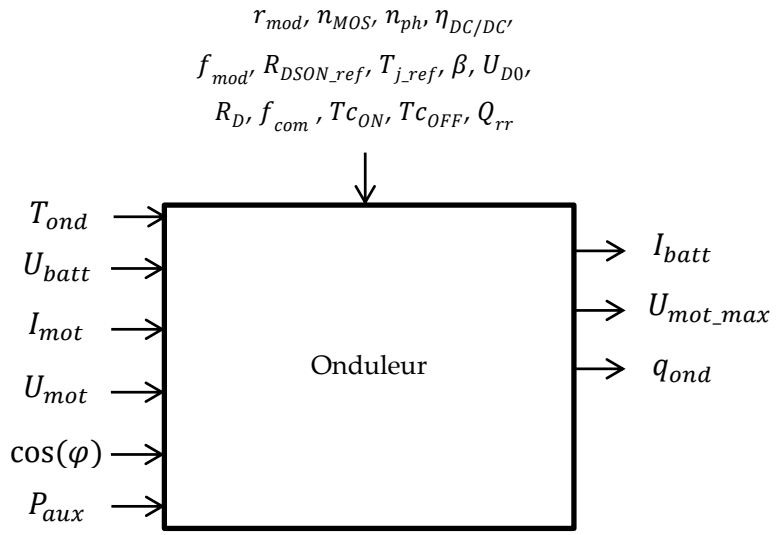


Figure 2.31 : Schéma bloc du modèle de l'onduleur

La Figure 2.32 représente le schéma bloc du modèle thermique en régime permanent de l'onduleur avec les entrées, les sorties et les données.

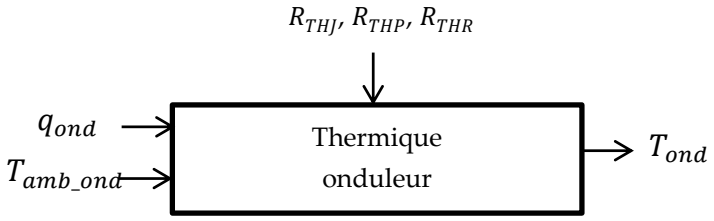


Figure 2.32 : Schéma bloc du modèle thermique de l'onduleur

Les variables sont le type de MOSFET utilisé, le nombre de puces en parallèle et la résistance thermique du dissipateur.

Les contraintes pour l'onduleur sont :

- La tension maximum admissible par les MOSFET
- La température de jonction pour le régime permanent
- Le courant maximum pour les pics de courants

2.2.4.3 Masse et cout

Comme pour le réducteur, les modèles de masse et de cout se basent sur la puissance de l'onduleur, en première approximation. Les coefficients ont été obtenus par des régressions linéaires entre différents onduleurs étudiés chez Renault (Twizy, Zoé, et autres projets). Pour la masse, 2 coefficients a et b ont été déterminés

$$M_{ond} = \left(a.P_{ond_max} + b\right) \tag{2.44}$$

Avec

M_{ond} : masse onduleur [kg]

P_{ond_max} : puissance maximum demandée à l'onduleur par le cahier des charges [W]. Pour connaitre cette puissance, il faut utiliser le modèle de véhicule qui nécessite de connaitre la masse des composants. Pour résoudre cette boucle algébrique, on part d'une masse initiale approximative et itère une ou deux fois pour arriver à une erreur sur la masse réducteur de moins de 1 kg.

Pour le cout, 2 coefficients, c et d ont été déterminés :

$$cout_{red} = \left(c.P_{ond_max} + d\right) \tag{2.45}$$

2.2.4.4 Validation sur la plage vitesse/couple

Le modèle de pertes onduleur a été validé en calculant le rendement en fonction de la vitesse véhicule et du couple à la roue. Figure 2.33).

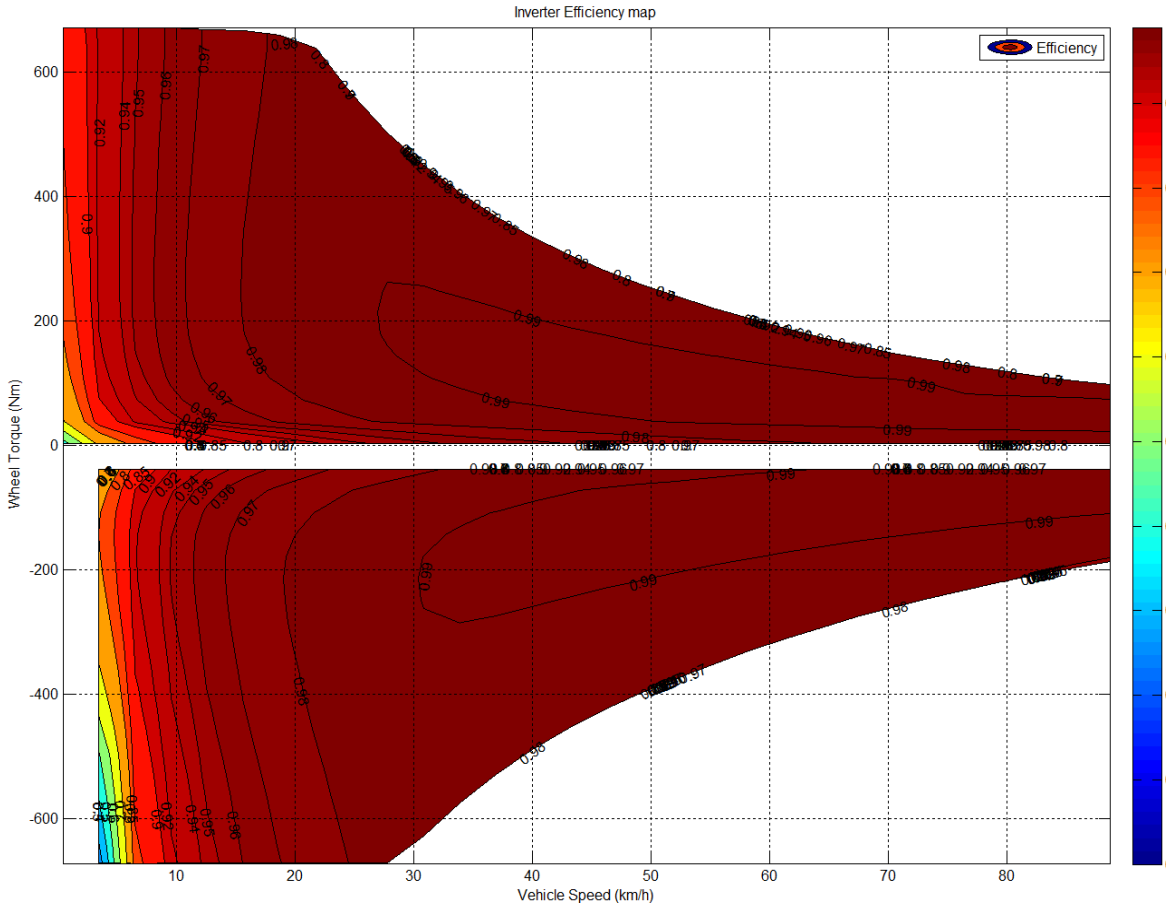


Figure 2.33 : Cartographie de rendement onduleur à $T_{ond} = 70\ °C$, $SOC = 40\ \%$ et $T_{batt} = 20\ °C$

Les valeurs obtenues sont cohérentes sur l'ensemble de la cartographie. La plage de rendement supérieur à 97 % est très large.

2.2.5 Modèle de la batterie

Le modèle de la batterie Li-ion doit permettre d'estimer la tension et la baisse d'état de charge de la batterie. Le choix des modèles utilisés est le suivant :

- Tension / état de charge : un modèle électrique permet de calculer l'évolution de l'état de charge et de la tension, en fonction du courant et de la température [JANI11] ;
- Influence de la température : la température influence fortement le fonctionnement de la batterie et est inclue dans les cartographies de tension à vide et des résistances ;
- Modèle thermique : bien que la température soit régulée sur les packs batteries, elle n'est pas une contrainte forte de dimensionnement. Les données des fournisseurs de cellules de batterie indiquent généralement des courants maximum à ne pas dépasser ;
- Modèle vibro-acoustique : la batterie ne présente pas de risque vibro-acoustique.

➢ **Tension**

La tension batterie disponible pour l'onduleur est calculée en fonction de l'état de charge, de la température batterie et du courant:

$$SOC(t+\Delta t) = SOC(t) - \frac{100.\Delta t.I_{batt}}{C_{cell}.np}$$

$$U_{batt} = \left(OCV(SOC,T_{batt}) - DCR(SOC,T_{batt}).\frac{I_{batt}}{np}\right).ns - R_{cable}.I_{batt} \quad (2.46)$$

Avec

T_{batt} : température batterie [°C]
I_{batt} : courant batterie [A]
C_{cell} : capacité nominale d'une cellule [Ah]
Δt : durée du point de fonctionnement considéré [h]
SOC : état de charge (State Of Charge)
OCV : tension circuit ouvert (Open Circuit Voltage) [V]
DCR : chute de tension sous un courant donné (Direct Current Resistance) [Ω]
ns : nombre de cellules en série
np : nombre de cellules en parallèle
R_{cable} : résistance dans les câblages entre la batterie et l'onduleur [Ω]

Les chutes de tension DCR diffèrent selon que l'on soit en charge ou décharge. L'OCV (Figure 2.34) et les DCR (Figure 2.35 et Figure 2.36) sont obtenus à partir de cartographie en fonction du SOC et de la température.

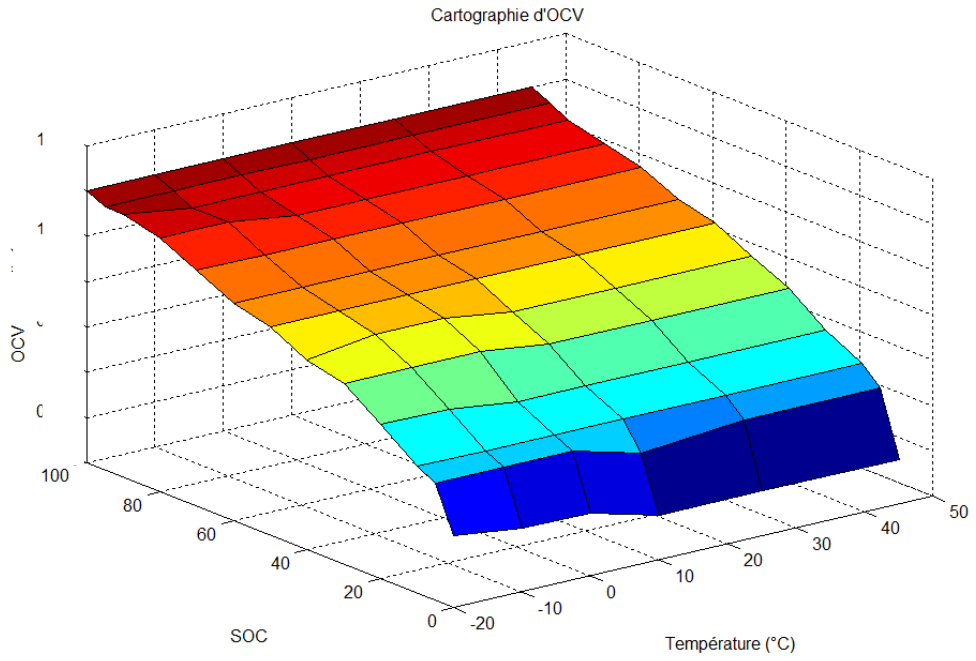


Figure 2.34 : Cartographie d'OCV en fonction du SOC et de la température

On observe le comportement classique d'une batterie où la tension diminue avec l'état de charge qui baisse.

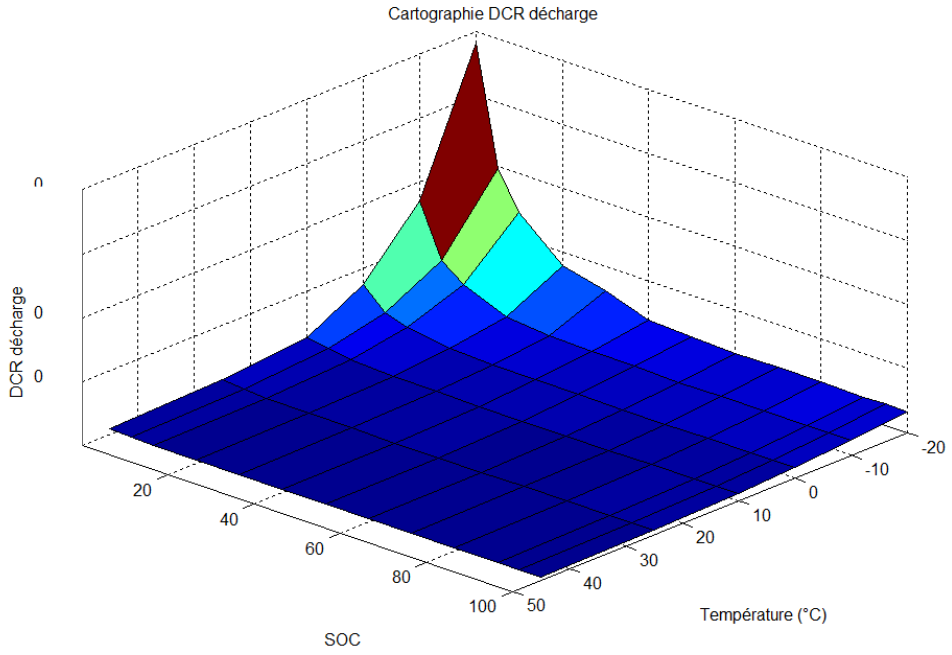


Figure 2.35 : Cartographie de DCR en décharge

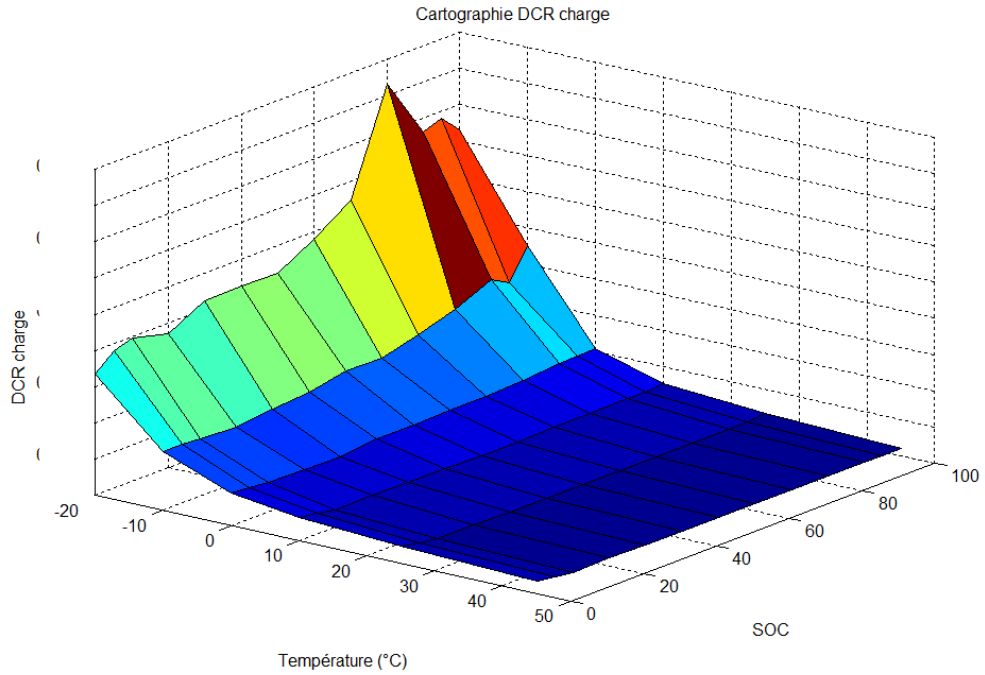


Figure 2.36 : Cartographie de DCR en charge

Les valeurs de DCR en décharge augmentent fortement aux faibles températures et états de charge et peuvent être la cause d'une tension batterie trop faible pour respecter les performances du véhicule dans certaines conditions.

- **Pertes**

Les pertes du modèle de batterie sont les pertes Joule des cellules et des câblages :

$$q_{batt} = (DCR.\frac{ns}{np} + R_{cable}).{I_{batt}}^2 \quad (2.47)$$

Avec

q_{batt} : pertes de la batterie [W]

2.2.5.1 Variables et contraintes

La Figure 2.37 représente le schéma bloc du modèle de l'onduleur avec les entrées, les sorties et les données.

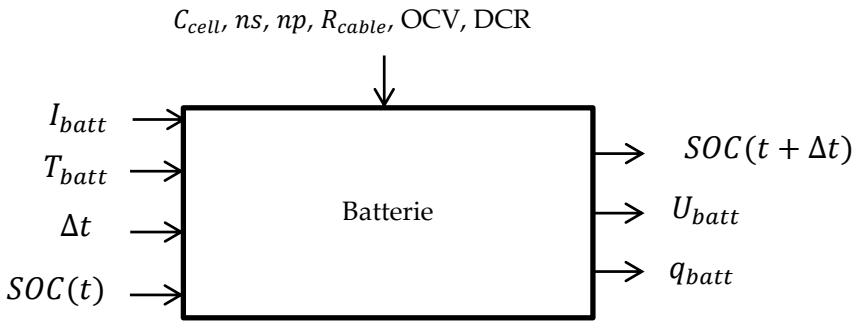


Figure 2.37 : Schéma bloc du modèle de batterie

Les variables sont le type de cellule (OCV, DCR, C_{cell}) et le nombre de cellules en série et en parallèle dans le pack.

Les contraintes pour la batterie sont :

- Le courant maximum admissible par cellule en charge et en décharge ;
- Les tensions minimum et maximum des cellules pour ne pas les dégrader.

2.2.5.2 Masse et cout

Un pack de batterie est divisé en cellules, rassemblées en modules qui forment un pack complet (Figure 2.38) :

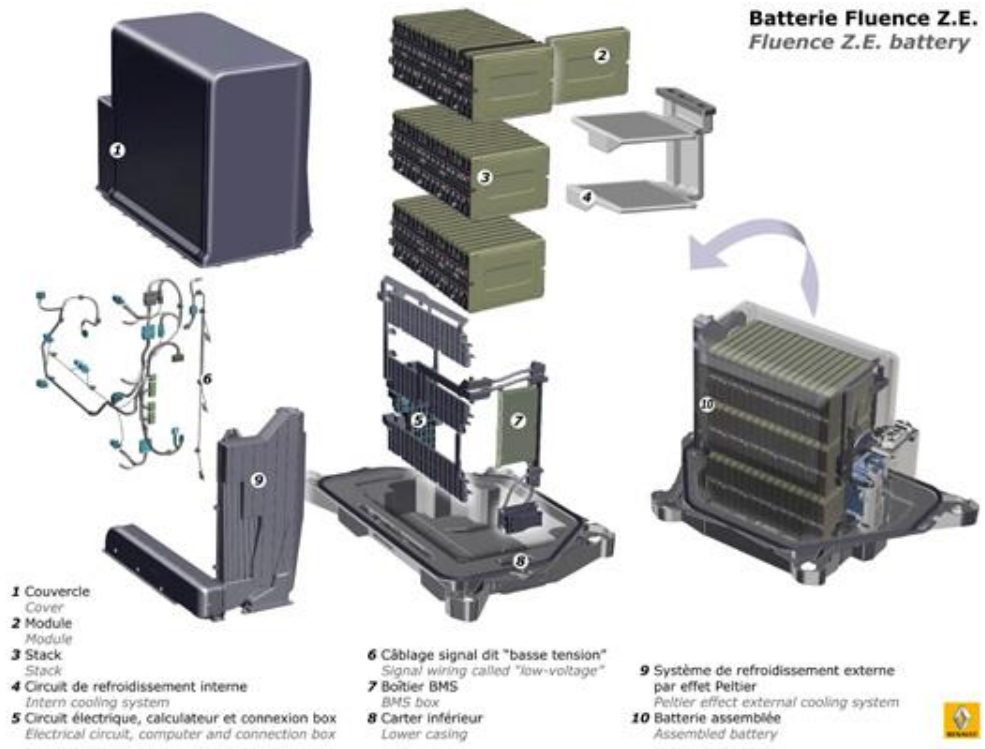


Figure 2.38 : Schéma d'un pack batterie de Renault Fluence ZE

La masse est calculée avec la formule suivante :

$$M_{batt} = ns.np\,.M_{cell}.(1 + a + b) \tag{2.48}$$

Avec

M_{batt} : masse du pack complet [kg]
M_{cell} : masse d'une cellule batterie [kg]
a : coefficient masse module
b : coefficient masse pack

Le modèle de cout intègre le cout des cellules, un cout dépendant du nombre de modules, et un coefficient pour le pack complet. Les coefficients sont calculés à partir des données Renault.

$$cout_{batt} = \left(C_{cell}.cout_{kwh} + c.\frac{ns.np}{d}\right).e \tag{2.49}$$

c : cout module [€]
d : nombre de cellules par module
e : coefficient cout pack
$prix_{kwh}$: cout des cellules par kwh [€]

2.2.5.3 Validation sur la plage vitesse/couple

Le modèle de pertes batterie permet de calculer un rendement en fonction de la vitesse véhicule et du couple à la roue (Figure 2.39). La notion de rendement batterie peut varier selon les auteurs, elle est ici calculée par la formule suivante :

$$\eta_{batt} = \frac{U_{batt}.I_{batt}}{U_{batt}.I_{batt} + q_{batt}} \tag{2.50}$$

Avec

η_{batt} : rendement batterie

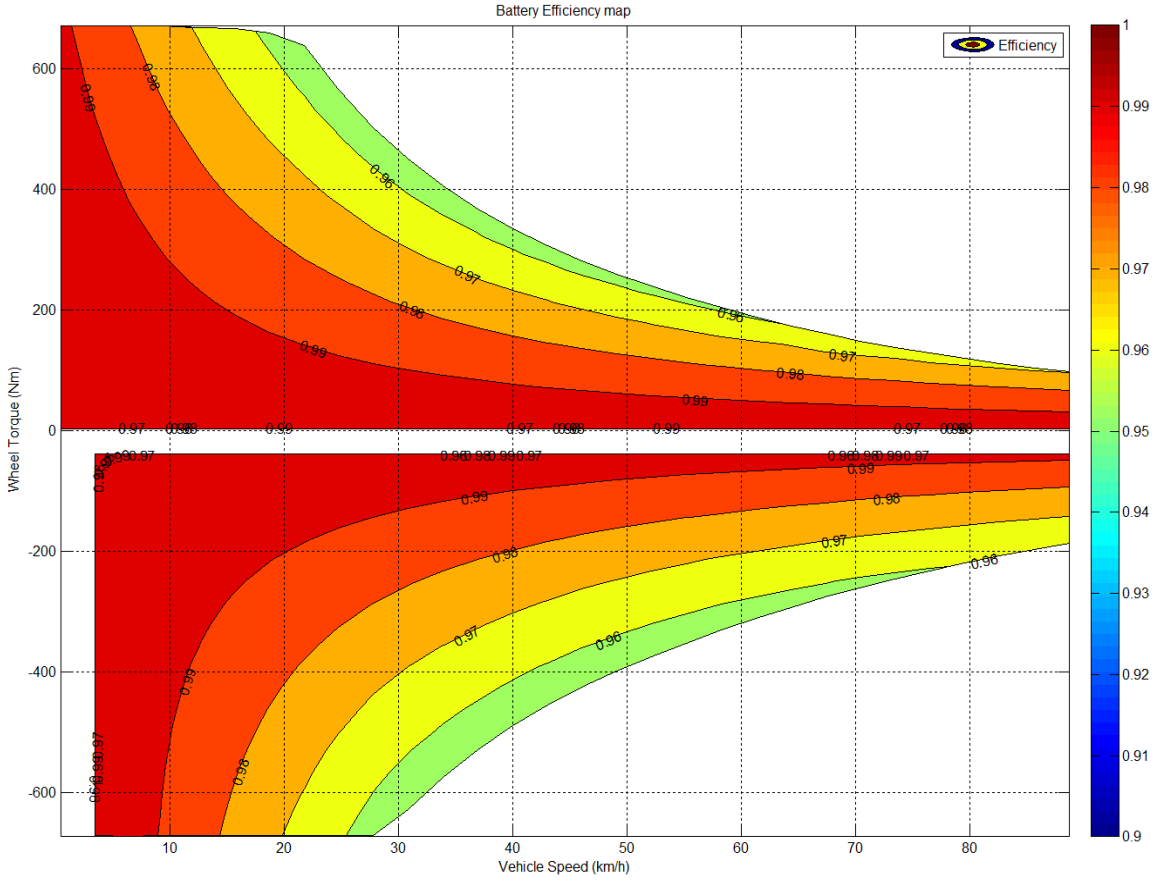


Figure 2.39 : Cartographie de rendement batterie à $SOC = 40$ % et $T_{batt} = 20\ °C$

Le rendement diminue avec la puissance qui augmente. Pour des températures froides et avec un état de charge bas, les rendements peuvent descendre à 80/85 %.

2.3 Modèle système

Ce paragraphe a pour but de décrire la connexion des modèles des composants pour obtenir le modèle système. Ce dernier sera testé dans différentes conditions afin d'établir l'importance de l'intégration de certains facteurs dans la modélisation.

2.3.1 Assemblage des modèles

L'assemblage des modèles est spécifique à notre objectif de conception par optimisation pour conserver les contraintes principales tout en réduisant le temps de calcul. Nous résumons les principales hypothèses effectuées :

- Les cycles de roulage sont représentés par une succession de régimes permanents ;
- Les grandeurs électriques alternatives sont considérées sinusoïdales (1er harmonique) ;
- La commande dynamique est supposée bien réalisée, et permettra d'atteindre le couple demandé.

La Figure 2.40 récapitule les liaisons entre les modèles, où la causalité n'est respectée que pour la tension batterie, tel que nous l'avions établi à la Figure 2.12.

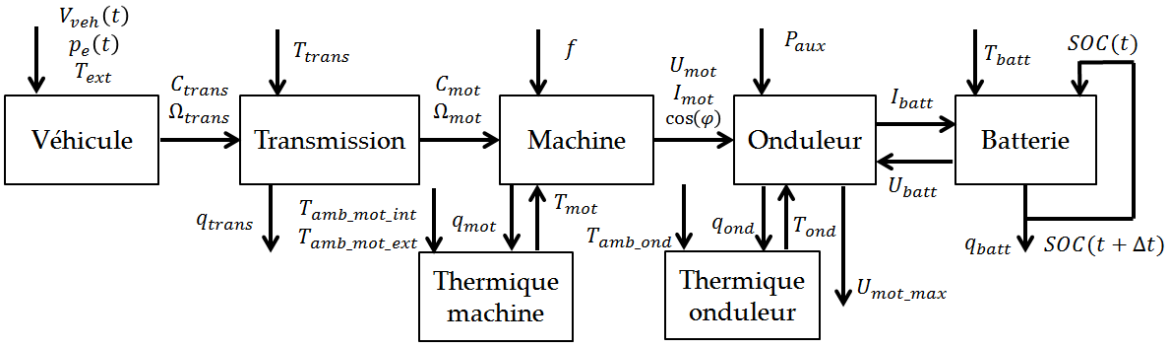


Figure 2.40 : Schéma de l'assemblage des modèles de la chaine

En fonction de ce que l'on souhaite simuler, un cycle de roulage pour l'autonomie ou un point de fonctionnement unique pour les contraintes, les boucles sur la tension batterie et les températures machine et onduleur peuvent être gérées différemment.

2.3.2 *Simulation de cycles dans différentes conditions*

Avec le modèle système, il est possible de simuler des cycles de roulage et d'observer l'évolution des grandeurs en fonction du temps. La Figure 2.41 représente par exemple l'évolution de l'état de charge batterie au cours du cycle WLTC Moyen (détail du cycle en Annexe A) avec une pente nulle et [Text,Tbatt,Tamb_ond,Tamb_mot_int,Tamb_ mot_ext] = 20 °C, [Ttrans,Tmot_init,Tond] = 50 °C , SOCinit = 50 %, Paux = 150 W.

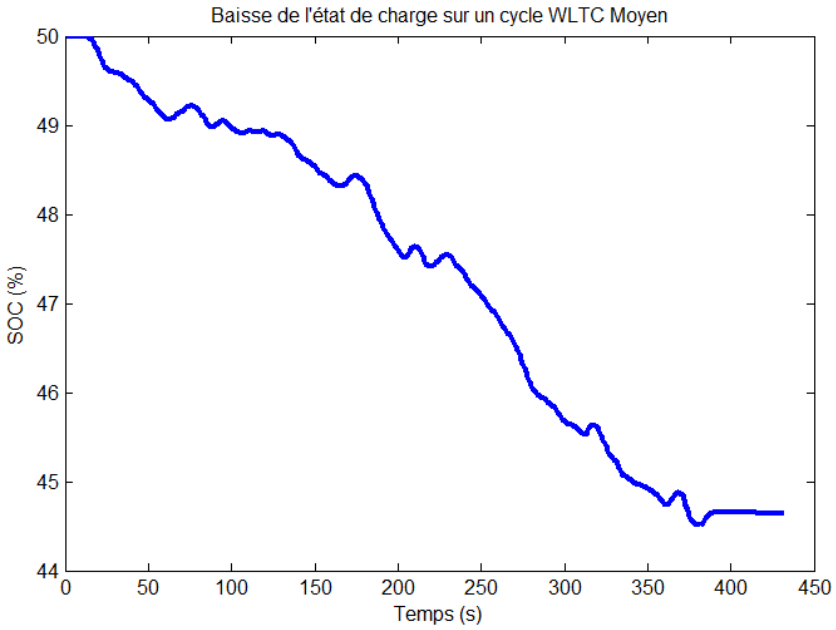


Figure 2.41 : Baisse de l'état de charge batterie sur le cycle WLTC partie « Basse »

On peut observer les phases de récupération d'énergie lorsque la courbe remonte. A partir de l'énergie consommée et de la distance parcourue, nous pouvons calculer la consommation du véhicule, généralement exprimée en kWh/100 km. Afin de se faire une idée de l'influence des conditions sur la consommation, trois comparaisons ont été faites :

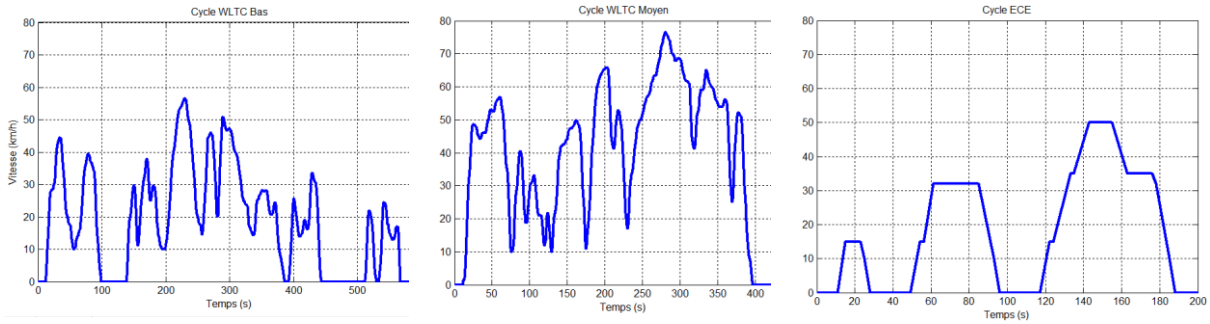
- Simulation de différents cycles (Figure 2.42) ;
- Simulation à différentes températures ;
- Simulation à différents états de charge.

Pour tous les calculs, on a Tamb_ond,Tamb_mot_int,Tamb_mot_ext = Text et Paux = 150 W. Pour la machine électrique, le modèle thermique transitoire est utilisé ; pour l'onduleur, le modèle thermique n'est pas utilisé. Les résultats sont rapportés dans le Tableau 2.3. Les valeurs de consommations sont comparées à une valeur de référence prise arbitrairement à 100. Les meilleures consommations sont les plus faibles.

Tableau 2.3 : Comparaison de la consommation dans différentes conditions

$[T_{ext},T_{batt}]$=20°C, $[T_{trans},T_{mot_init},T_{ond}]$=50 °C, SOC_{init}=50 %		
WLTC Bas	WLTC Moyen	ECE
81.9	100	80.1
WLTC Moyen, SOC_{init}=50 %		
$[T_{ext},T_{batt}]$=-10 °C, $[T_{trans},T_{mot_init},T_{ond}]$=20 °C	$[T_{ext},T_{batt}]$=20 °C, $[T_{trans},T_{mot_init},T_{ond}]$=50 °C	$[T_{ext},T_{batt}]$=40 °C, $[T_{trans},T_{mot_init},T_{ond}]$=80 °C
130.0	100	92.7
WLTC Moyen, $[T_{ext},T_{batt}]$=20 °C, $[T_{trans},T_{mot_init},T_{ond}]$=50 °C		
SOC_{init}=10 %	SOC_{init}=50 %	SOC_{init}=95 %
116.8	100	93.6

Les écarts entre les résultats sont sensibles et montrent l'intérêt d'intégrer ces conditions dans le cahier des charges. Les cas avec température froide et état de charge bas sont les plus contraignants sur la consommation et donc sur la puissance requise.



a) Cycle WLTC Bas b) Cycle WLTC Moyen c) Cycle ECE

Figure 2.42 : Cycles comparés

2.3.3 *Validation sur la plage vitesse/couple*

Les cartographies de rendement dans le plan vitesse/couple ont été générées à partir des modèles de pertes pour chaque composant afin de valider le bon comportement de chaque modèle sur toute la plage vitesse/couple. La Figure 2.43 présente la cartographie du rendement de la chaine complète : réducteur + moteur + onduleur + batterie.

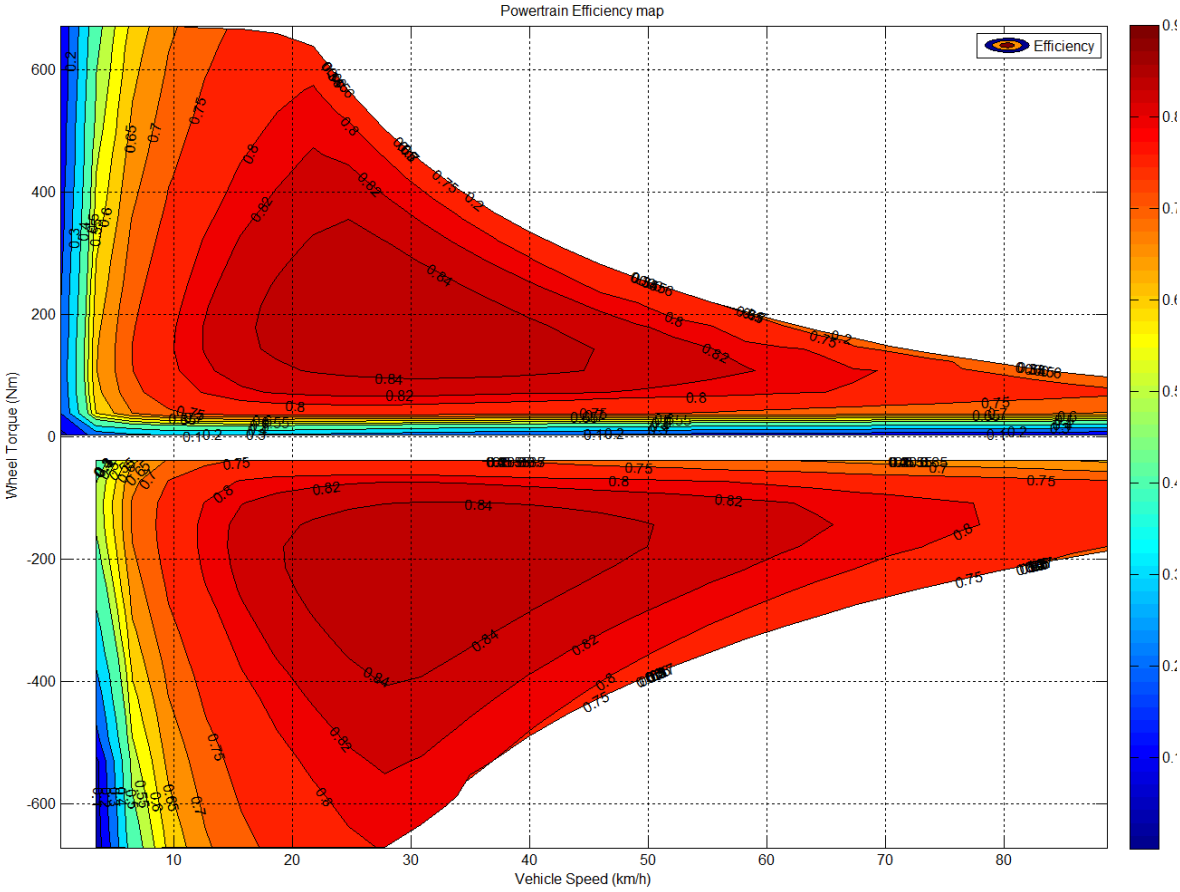


Figure 2.43 : Rendement de l'ensemble chaine de traction pour $T_{trans} = 70\,°C$, $T_{mot} = 70\,°C$, $T_{ond} = 70\,°C$, $SOC = 40\,\%$ et $T_{batt} = 20\,°C$

La zone de meilleur rendement est 84 %, pour la chaine de traction considérée, avec les conditions suivantes : $T_{trans} = 70\,°C$, $T_{mot} = 70\,°C$, $T_{ond} = 70\,°C$, $SOC = 40\,°C$ et $T_{batt} = 20\,°C$. L'allure générale de la cartographie est proche de celle de la machine seule (Figure 2.29). Les zones à faible vitesse/couple atteignent des rendements parfois inférieurs à 10 %, mais elles représenteront des quantités d'énergie faibles sur cycle.

2.3.4 *Contraintes de performance pour le véhicule*

La simulation d'un cycle de roulage permet d'estimer l'autonomie du véhicule qui est un objectif de notre problème. En plus de ce cycle, notre cahier des charges au niveau véhicule comprend des contraintes de performances qui peuvent être :

- Grimper une pente donnée à vitesse faible ;
- Réaliser une accélération ;
- Maintenir une vitesse maximum.

Ces performances sont traduites par des portions de cycle de 2 points, que nous simulons ensuite avec le modèle système. La Figure 2.44 est un exemple de portion de cycle pour grimper une pente donnée.

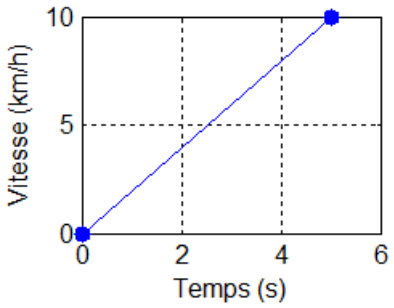


Figure 2.44 : Exemple de portion de cycle (2 points) pour la contrainte de performance « grimper une pente de 20 % »

Lors de la simulation de cette portion de cycle, nous nous intéressons aux contraintes au niveau des différents composants (limites de tension, courant, température, résistance mécanique …). Si celles-ci ne sont pas respectées, alors le véhicule n'est pas capable de respecter ces performances.

2.4 Bilan

Dans ce chapitre nous avons d'abord comparé les niveaux de modélisation pour faire des choix :

- Utilisation de modèles analytiques rapides pour la modélisation système plutôt que semi-analytique ou éléments finis ;
- Echelles temporelles électronique (onduleur), électromagnétique (moteur) et électrique (batterie) non simulées : les grandeurs sont considérées sinusoïdales et les modèles considèrent des grandeurs efficaces. On peut parler ici de régime permanent électrique ;
- L'échelle mécanique est représentée par un enchainement de points discrétisé à la seconde. Pour autant les accélérations du véhicule sont bien prises en compte ;
- L'enchainement des modèles ne respecte pas la causalité : nous cherchons à savoir si la chaine de traction considérée est capable de respecter les performances demandées sans calculer les performances réellement atteintes le cas échant. L'objectif n'est pas ici d'étudier la commande dynamique d'un système connu.

Puis chaque modèle a été détaillé :

- Véhicule : le cycle de roulage du véhicule est converti en vitesse et couple à la roue à partir des équations de la mécanique permettant d'estimer les forces de frottement de l'air, des pneus ou d'accélération ;
- Réducteur : séparation des pertes par dentures et par trainée. La modélisation des pertes par trainée est basée sur des résultats d'essais ;

- Machine : schéma équivalent monophasé incluant la saturation et les pertes fer ; contrôle énergétique avec un degré de liberté ; modèle thermique par réseau de réluctance, régime permanent et transitoire ;
- Onduleur : décomposition des pertes par conduction et commutation dans les diodes et les transistors. Modèle thermique très simplifié en régime permanent ;
- Batterie : modèle électrique en « E-RI » avec des cartographies de tension à vide et résistance interne dépendantes de l'état de charge et de la température ;
- Un modèle d'estimation de la masse et du cout est intégré pour chaque composant.

Les phénomènes modélisés en fonction des composants sont résumés dans le Tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Résumé des phénomènes modélisés en fonction des composants

Physique \ Modèle	Véhicule	Transmission	Machine	Onduleur	Batterie
Mécanique	x	x	x		
Electromagnétique			x		
Electrique			x	x	x
Impact de la température	x	x	x	x	x
Thermique régime permanent			x	x	
Thermique régime transitoire			x		
Vibro-acoustique					
Masse		x	x	x	x
Cout		x	x	x	x

La dernière partie décrit l'assemblage des modèles et donne des résultats de simulations du modèle système : baisse de l'état de charge en fonction du temps lors de la simulation d'un cycle de roulage. Une étude paramétrique permet de voir l'impact important sur l'autonomie de certains facteurs comme le cycle de roulage, l'état de charge ou la température de la batterie ; les variations peuvent aller jusqu'à 24 % pour nos exemples. Sur la base de ce modèle système, le chapitre 3 permettra d'établir une architecture d'optimisation adaptée à nos objectifs d'autonomie et de cout sous contraintes de performances, afin de minimiser les temps de calcul qui malgré l'utilisation de modèle analytique peuvent être rédhibitoires.

Chapitre 3 Choix d'une architecture pour l'optimisation

Nous avons mis en place au chapitre précèdent un modèle système qui permet de simuler, pour une chaine de traction donnée, les objectifs de notre problème, c'est-à-dire l'autonomie sur un cycle de roulage et le cout, mais également de vérifier les performances du véhicule. Le challenge de ce chapitre est d'exploiter le modèle système dans le cadre d'une optimisation qui va faire appel des milliers de fois au modèle. Bien que notre modèle analytique soit assez rapide, la simulation d'un cycle ainsi que le choix du contrôle pour la machine et sa thermique, vont trop allonger les temps de calcul. C'est dans l'optique de réduction de ce temps que nous avons mis en place ce que nous appelons une architecture d'optimisation. Dans ce chapitre, nous avons donc joué sur la structure du problème en comparant différentes possibilités sur le cycle, le contrôle ou encore la thermique pour établir les meilleurs choix.

La première section fait un état de l'art des méthodes d'optimisation. Nous analyserons ensuite la répartition du temps de calcul du modèle système afin d'établir les ordres de grandeur. Les parties suivantes détaillent les études réalisées sur différents éléments de la conception. Le contrôle de la machine est d'abord analysé et démontre l'intérêt d'un contrôle optimal. L'intégration de ce contrôle optimal sur un cycle de roulage nécessite de simplifier le cycle pour ne pas augmenter excessivement le temps de calcul. Deux possibilités de simplification seront comparées. Une fois le cycle simplifié, la gestion des variables de contrôle dans l'architecture d'optimisation sera étudiée, car notre problème offre plusieurs possibilités pour cette gestion. Ensuite, la gestion des bouclages évoquée à la section 2.1.3 sera détaillée et analysée : plusieurs stratégies seront comparées. Enfin l'estimation de certaines grandeurs physiques nécessite des calculs éléments finis, dont l'intégration dans l'architecture d'optimisation sera décrite.

La terminologie utilisée dans le cadre de l'optimisation peut varier en fonction des auteurs. Les choix faits sur le vocabulaire sont les suivants :

- Un **Algorithme** d'optimisation est un code d'optimisation donné, par exemple Simplex, SQP, algorithme génétique, recuit simulé, etc. ;
- Une **Méthode** d'optimisation est une classification des algorithmes, par exemple méthode linéaire ou gradient. La distinction algorithme/méthode est parfois floue, il existe par exemple plusieurs variantes de l'algorithme *Branch&Bound* que l'on peut regrouper en méthodes *Branch&Bound* ;

- Une **Stratégie** d'optimisation (ou procédure) intègre un algorithme dans une démarche spécifique, par exemple, l'*Output Space Mapping* ou l'*Efficient Global Optimization* ;
- Une **Architecture** (ou structure) est un agencement de modèles, d'algorithmes et de stratégies d'optimisation pour répondre à une problématique.

On obtient alors l'imbrication de la Figure 3.1.

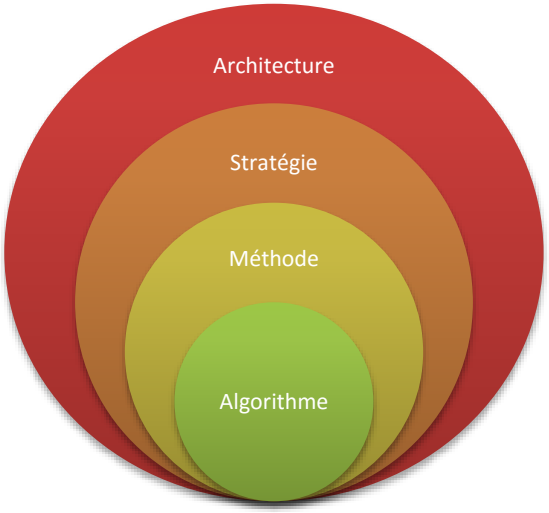


Figure 3.1 : Schéma de la conception par optimisation

Notre travail ne portera pas sur les algorithmes, ils seront simplement utilisés, mais s'orientera sur les méthodes, stratégies et architectures qui permettront de mettre en place un problème de conception par optimisation.

3.1 Méthodes et stratégies d'optimisation

Le but de ce paragraphe n'est pas de faire un bilan exhaustif des méthodes d'optimisation, mais de présenter quelques possibilités, en particulier celles utilisées en génie électrique [SARE99],[BRIS07],[GILL09].

3.1.1 Classification des problèmes d'optimisation

La formulation générique d'un problème d'optimisation peut s'écrire :

$$\text{Trouver } \bar{x} \text{ tel que : } \begin{cases} f(\bar{x}) = \min f(x) \\ \bar{x} \in \chi \\ h(\bar{x}) = 0 \\ g(\bar{x}) < 0 \end{cases} \tag{3.1}$$

Où f est la fonction objectif à minimiser, h et g sont respectivement appelées fonction de contraintes d'égalité et d'inégalité. À partir de cette formulation, il est possible de classer les problèmes d'optimisation :

- **Contraint / Non Contraint**

- Un problème contraint, fait appel à g ou/et h,
- Un problème non contraint n'utilise pas g ni h, il minimise seulement l'objectif f ;

- **Espace discret / continu**
  - Un problème continu a un espace des variables et des solutions réelles,
  - Un problème en nombres discrets (ou combinatoires) a un nombre fini d'états pour ces variables et par conséquent sur les solutions,
  - Un problème mixte a des variables discrètes et réelles ;
- **Propriétés des fonctions f, g et h**
  - Un problème linéaire a toutes ses fonctions linéaires,
  - Un problème quadratique est bâti avec une somme de fonction quadratique et avec des contraintes linéaires,
  - Un problème non linéaire a au moins une fonction non-linéaire.

Il est important de connaitre la nature de son problème d'optimisation pour pouvoir lui appliquer l'algorithme le mieux adapté. Pour notre application sur les chaines de tractions, le problème est contraint, mixte et non linéaire.

D'autres propriétés du problème permettent de guider la sélection d'algorithmes :

- **Optimum global ou local**

  On parlera d'un extrémum en a si $\nabla f(a) = 0$. Un minimum sera global, s'il est le plus petit des minimums sur l'espace considéré (Figure 3.2). Les problèmes dits convexes ont un extrémum unique qui est donc global. Si le problème d'optimisation est convexe, une méthode d'optimisation à base de gradient est sûre de trouver l'extremum global. Or la modélisation des phénomènes physiques que nous considérons amène souvent à des problèmes d'optimisation non convexes. Pour résoudre cette difficulté, il est possible d'utiliser des méthodes d'optimisation qui permettent une exploration de l'espace des solutions afin d'obtenir l'optimum global. Il est également possible d'utiliser une stratégie utilisant une méthode locale à base de gradient avec une exploration réalisée grâce à l'utilisation de multiples points initiaux [NOWR99] ;

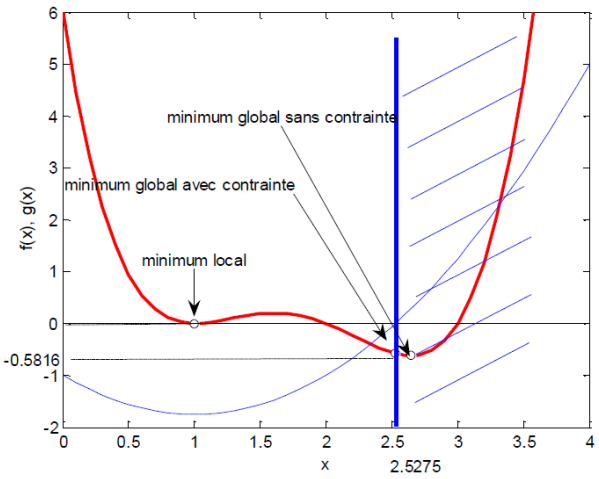


Figure 3.2 : Exemple d'un problème d'optimisation non convexe avec minimum local et global sous contraintes [GILL09]

- **Nombre d'objectifs**
  Certaines méthodes permettent de traiter des problèmes multiobjectifs [COSI02]. Le résultat sera alors un compromis entre chaque objectif, si ceux-ci sont contradictoires. L'ensemble des solutions optimales est nommé front de Pareto. Des stratégies d'optimisation peuvent être utilisées pour transformer un problème multiobjectif en un ensemble de problèmes monoobjectifs, par exemple en pondérant les fonctions objectifs et en faisant varier entre chaque problème la pondération.

3.1.2 Algorithmes d'optimisation

En fonction du problème d'optimisation posé, il sera donc possible de s'orienter vers tel ou tel types d'algorithmes. Ceux-ci sont classés en deux grandes familles : déterministe et méta-heuristique

Les méthodes déterministes ne font pas intervenir de facteur aléatoire dans leur résolution. Certaines méthodes utilisent le calcul des dérivées premières ou secondes du modèle. On peut citer les méthodes du gradient conjugué ou les méthodes dites « de Newton » [GIMS05]. L'algorithme SQP (Sequential Quadratic Programming) sera utilisé dans notre travail [VENK01]. L'esprit de cette méthode est de partir d'une valeur initiale x0 et de construire un modèle local quadratique à chaque itération pour actualiser l'optimum. Les critères d'arrêt sont appelés équations KT (Kuhn et Tucker) qui sont des conditions nécessaires (mais non suffisantes) d'optimalité du problème. Si le gradient peut être obtenu grâce à une dérivée symbolique, la rapidité de convergence est fortement augmentée. Dans le cas d'un modèle type « boite noire », la dérivée est obtenue par différence finie ce qui alourdit la méthode. L'algorithme SQP présente l'avantage de traiter efficacement les contraintes d'un problème non linéaire, mais nécessite des variables continues. D'autres méthodes ne nécessitent pas la connaissance des dérivées comme les algorithmes Branch and Bound [EDHL89] ou le Simplexe [NEME65].

Les méta-heuristiques permettent d'avancer vers l'optimum. Il s'agit généralement de méthodes stochastiques qui tentent de s'approcher de la meilleure solution grâce à un mécanisme de sélection et d'exploration. Il est généralement assez difficile d'avoir une très grande précision sur la position de l'optimum global. Ces méthodes requièrent un nombre important d'évaluations des fonctions objectifs et contraintes pour fonctionner. Certains de ces algorithmes sont inspirés par la sélection naturelle. On distingue par exemple les algorithmes génétiques, le recuit simulé, la recherche par essaim de particules, les colonies de fourmis [MOUS09], etc. Dans ce travail, nous utiliserons l'algorithme NSGA-II [DPAM02] qui permet de résoudre un problème multiobjectif à variable mixte de manière globale.

Les algorithmes d'optimisation peuvent être combinés entre eux pour former des méthodes hybrides, par exemple utiliser une méta-heuristique pour obtenir un résultat approché, mais global puis un gradient pour avoir le résultat précis. Lorsque le nombre de variables augmente, le nombre d'appels aux fonctions du modèle pour une optimisation augmente également. Il n'est pas rare de devoir exécuter le modèle 1 000 ou 10 000 fois. Lorsque les temps de calcul ne sont plus acceptables,

des stratégies d'optimisation peuvent permettre d'améliorer la rapidité de résolution d'un problème d'optimisation en faisant par exemple, intervenir différents niveaux de modèles dans le processus.

3.1.3 Stratégies d'optimisation

Les stratégies d'optimisation ont généralement pour but l'accélération du temps de calcul. Pour atteindre ce but, certaines stratégies utilisent la possibilité d'exploiter 2 modèles d'un même dispositif. Un modèle fin, précis, mais long en temps de calcul, est remplacé par un modèle grossier rapide, mais moins précis. On parle alors de multi-granularité. Le modèle rapide peut être un modèle physique ou un modèle type surface de réponse. D'autres stratégies interviennent au niveau de l'expression du modèle notamment dans les modèles multi disciplinaires où des boucles algébriques entre les modèles peuvent pénaliser les temps de résolution.

3.1.3.1 Surfaces de réponses

Un modèle de substitution est construit à partir d'un plan d'expérience réalisé sur le modèle fin et avec un modèle d'interpolation. Le plan d'expériences permet de définir un nombre fini d'échantillons qui serviront de point support au modèle d'interpolation. Le modèle fin sera sollicité pour évaluer la fonction pour chaque échantillon. Le nombre d'échantillons et leur position influent sur la précision de la surface de réponses. Lorsque la dimension du problème est importante, une technique de screening peut être utilisée pour rechercher les facteurs les plus influents parmi un nombre important de facteurs [VIVI02]. D'autres techniques existent pour connaitre l'influence des facteurs comme les indices de sensibilité de Sobol ou le coefficient de corrélations de Pearson [MAGM07]. Les modèles de surfaces de réponses sont fréquemment des modèles polynomiaux du premier ou second ordre. Mais d'autres modèles existent comme les fonctions radiales de base (Radial Basis Function ou RBF en anglais) ou les modèles de Krigeage qui sont connus pour être très performants [JICS01].

La Figure 3.3 présente les trois types d'interpolation cités sur un exemple avec les mêmes points supports. On observe que la forme de la fonction interpolée varie fortement en fonction du modèle d'interpolation, avec une erreur qui augmente rapidement aux extrémités du domaine. Toutes ces méthodes d'interpolation sont bien adaptées pour gérer les variables continues, mais permettent difficilement de gérer les variables combinatoires.

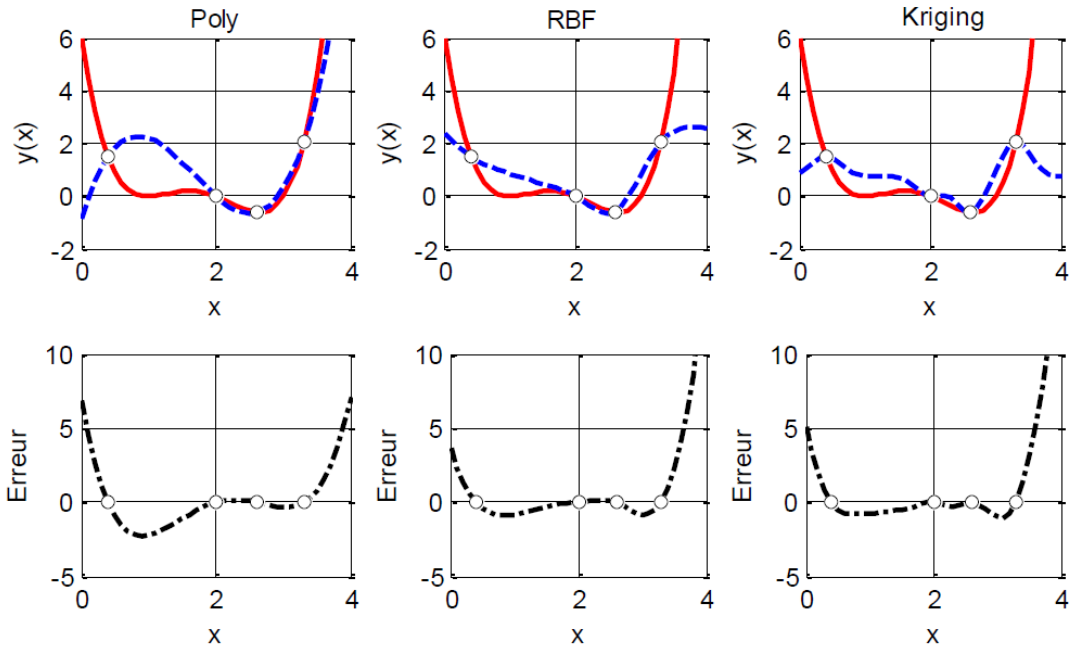


Figure 3.3 : Trois interpolations différentes avec la même fonction et les mêmes points supports [GILL09]

Grâce à ces modèles de substitution, il devient possible de résoudre des problèmes d'optimisation de dispositifs nécessitant des modèles lourds en temps de calcul en remplacent le modèle lourd par le modèle de substitution sur lequel l'algorithme d'optimisation pourra être exécuté, on effectue ainsi les actions de la Figure 3.4:

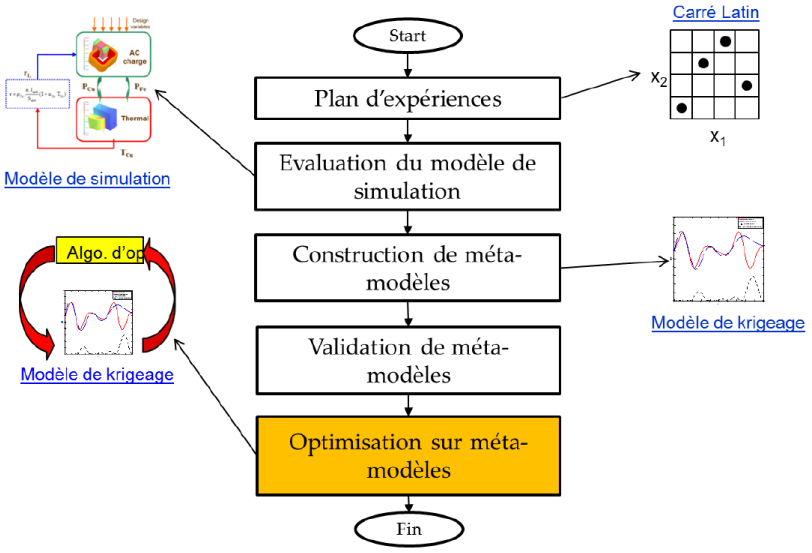


Figure 3.4 : Schéma générique d'une stratégie d'optimisation sur surface de réponse [BERB12]

Par ailleurs, des stratégies permettent de se limiter à de petits plans d'expérience pour commencer, puis d'ajouter des points autour de la position supposée de l'optimum afin d'améliorer la qualité de la surface de réponse. On peut citer par exemple des stratégies de glissement, de zoom,

ou encore la stratégie Efficient Global Optimisation (EGO) qui mixte la recherche d'un optimum précis et l'exploration du domaine dans la sélection des nouveaux points à rajouter [SCWJ98].

Dans le cadre de ce travail, nous utiliserons l'apprentissage automatique (machine learning) afin de former l'équivalent d'une surface de réponses, pour pouvoir gérer à la fois les variables continues et discrètes. C'est une stratégie très utilisée dans des domaines comme la robotique ou la reconnaissance d'image qui vise à apprendre les caractéristiques d'une population pour en reconnaitre certains schémas [SEBA01]. La stratégie sera détaillée à la section 3.6.2.

3.1.3.2 Stratégies multigranularités

Lorsque le concepteur dispose de plusieurs granularités différentes d'un même modèle, il est possible d'exploiter des stratégies multigranularités pour accélérer les temps de calcul. Les niveaux de granularité peuvent être par exemple des modèles numériques et analytiques, ou encore différents niveaux de finesse dans le maillage d'un modèle numérique [AGBG12]. Ces modèles seront exploités avec des stratégies de space mapping [BABA01] qui permettront de corriger le modèle grossier par quelques appels au modèle fin. L'algorithme d'optimisation est systématiquement lancé sur le modèle grossier. La façon d'appliquer la correction donne lieu à différentes méthodes, par exemple le manifold mapping (MM) ou le Output Space Mapping (OSM). Le principe de cette méthode est représenté sur la Figure 3.5 où le bloc « S » représente la fonction de correction :

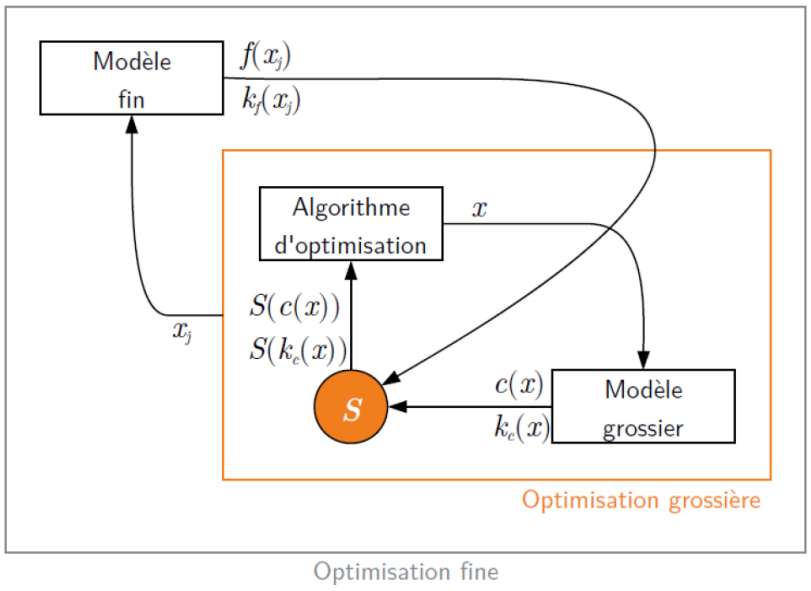


Figure 3.5 : Schéma de principe de l'OSM [PIER14]

Dans le cadre de ce travail, nous disposons pour la machine électrique d'un modèle analytique et éléments finis. Ces deux modèles nous permettront d'exploiter une stratégie multigranularité. Nous avons choisi la stratégie OSM pour corriger notre modèle analytique. Ce travail est développé au paragraphe 3.7.

3.1.3.3 Optimisations multidisciplinaires

L'optimisation multi disciplinaires, Multidisciplinary design optimization (MDO) est une stratégie de **décomposition des modèles** en fonction des disciplines, des physiques ou des composants. On parlera de stratégie mono-niveau lorsqu'il n'y a qu'une boucle d'optimisation pour gérer les disciplines et leurs connexions. On parlera de stratégie multiniveau lorsqu'il y a plusieurs boucles d'optimisation qui échangent des variables ou contraintes entre elles.

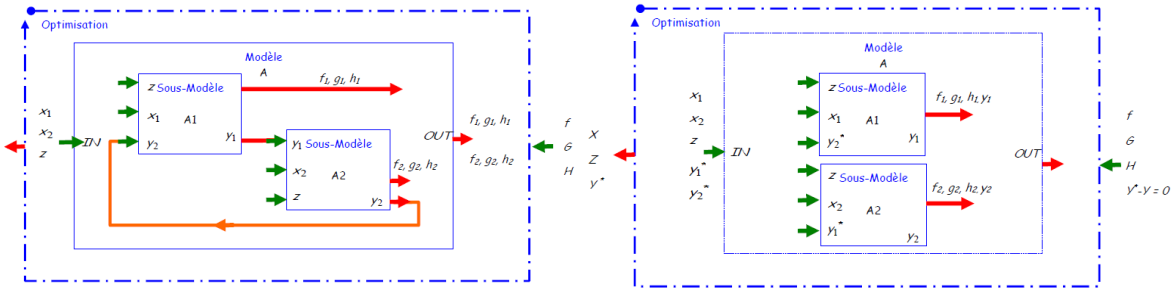
- **Stratégies mononiveau**

Dans la littérature, on distingue trois stratégies en fonction des choix de couplages entre les disciplines : MultiDisciplinary Feasible (MDF), Individual Discipline Feasible (IDF), et All-At-Once (AAO) [BERB12].

La stratégie MDF est la façon de faire classique. Pour chaque itération de l'optimisation, la compatibilité entre les disciplines est vérifiée par le modèle, par exemple avec une méthode de points fixes.

La formulation IDF peut permettre de réduire le temps de calcul du modèle avec un couplage entre les différentes disciplines gérées par le processus d'optimisation. C'est donc simplement à la fin de l'optimisation que la consistance du modèle est obtenue à condition que l'algorithme ait bien convergé. Pour ce faire, la stratégie rajoute des variables et contraintes de couplage entre disciplines. Cela permet également de paralléliser le calcul de chaque discipline puisqu'elles ne dépendent plus les unes des autres.

La formulation AAO est très proche d'IDF. Une variable de contrôle et une sortie sous forme de résidu doivent être ajoutées aux disciplines ce qui nécessite de pouvoir modifier ces modèles, ce qui n'est pas toujours possible lorsque les modèles sont sous forme de boite noire.



a) Stratégie MDF b) Stratégie IDF

Figure 3.6 : Structure de deux stratégies mononiveau [GILL09]

Pour MDF, la Figure 3.6 montre le bouclage entre les sous modèles A1 et A2, alors que pour IDF la consistance du modèle est assurée par l'ajout des variables (y*) et contraintes (y*-y=0) à l'optimisation. Dans le cadre de ce travail, la stratégie IDF sera testée sur l'intégration du modèle thermique de la machine électrique au paragraphe 3.4.

➢ **Stratégies multiniveaux**

Pour la conception d'un dispositif complexe, il peut être intéressant de décomposer le problème d'optimisation pour obtenir un problème plus abordable. Mais cette décomposition ne doit pas faire perdre les interactions entre les éléments qui sont rarement indépendantes les unes des autres. Des stratégies de conception multiniveaux ont été développées dans ce but comme le Collaborative Optimization (CO) [BRKR95], le Bi-Level Integrated System Synthesis (BLISS) [SOAS98], ou le Analytical Target Cascading (ATC) [MIKP99]. La stratégie ATC consiste à optimiser chaque système ou sous-système séparément en y ajoutant des variables et contraintes qui permettront la cohérence globale de la stratégie d'optimisation.

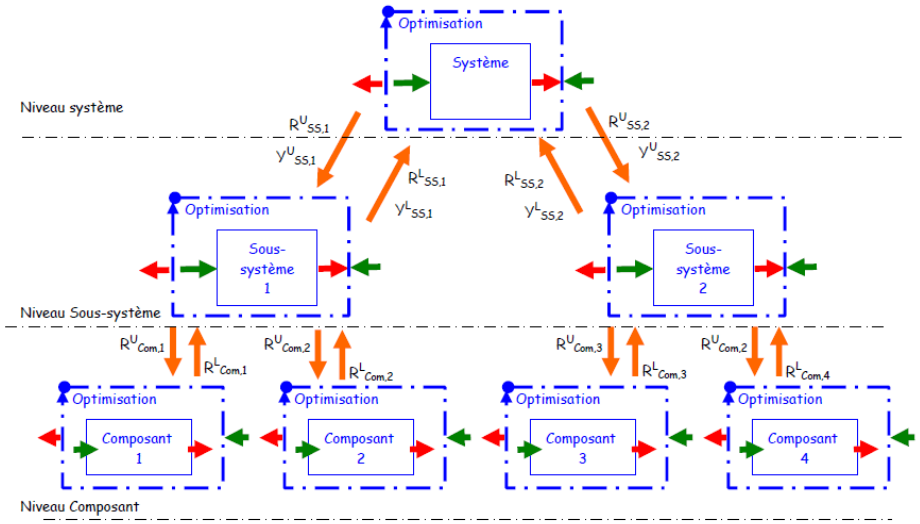


Figure 3.7 : Décomposition hiérarchique liée à une méthode ATC [GILL09]

La Figure 3.7 représente un schéma général d'une stratégie ATC à 3 niveaux de décompositions faisant apparaitre les variables d'échanges entre les processus d'optimisation. Séparer l'optimisation de chaque sous-système est intéressant lorsque leurs résolutions simultanées sont impossibles :

- La résolution complète est impossible parce que les algorithmes utilisés pour l'optimisation de chaque sous-système sont différents par exemple ;
- Les sous-systèmes sont développés par différentes entités qui ne souhaitent pas partager leurs modèles ou leurs méthodes d'optimisation.

Pour le cas de notre chaine de traction, le modèle système analytique rapide ne justifie pas d'effectuer une décomposition de type ATC qui risquerait de dégrader les temps de calcul en rallongeant la convergence de chaque sous-système. Par contre, l'intégration du contrôle a fait l'objet d'une étude mono et bi-niveau. Il s'agira de comparer des stratégies avec une boucle d'optimisation imbriquée ou non. Ce travail est présenté au paragraphe 3.3.4.

3.1.4 Robustesse d'une optimisation

L'analyse de robustesse n'est pas à proprement parler une méthode ou stratégie d'optimisation, elle peut se définir comme la détermination du domaine de variation de certains paramètres dans lequel un classement ou un choix reste stable. Elle informe l'utilisateur de la capacité d'une solution

à résister à des variations entre la réalité et le modèle censé la représenter [MAPS94]. Dans le cas d'un pré-dimensionnement où il y a beaucoup d'incertitude sur les paramètres, l'analyse de robustesse sera bien indiquée : notre dimensionnement optimal est-il toujours bon si un autre cycle de fonctionnement est utilisé? Ou si le cout des composants devait changer? Si les résultats sont très différents, il est alors intéressant de réaliser une optimisation avec ces nouveaux paramètres. Cela rend d'autant plus intéressant le fait de conserver des temps de calcul assez rapides. La robustesse d'une optimisation sur certains critères sera testée au paragraphe 4.3.3.2.

3.1.5 *Bilan des stratégies d'optimisation*

Les stratégies présentées ici permettent de traiter plusieurs axes de travail pour aider à la mise en place d'une conception par optimisation : l'axe multi-niveau, multi-physiques et multi-granularité (Figure 3.8

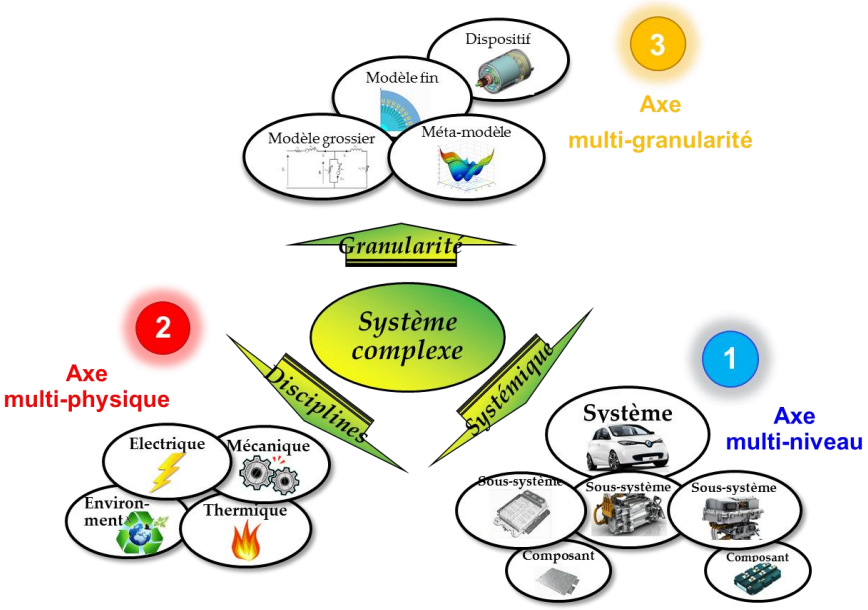


Figure 3.8 : 3 axes pour les stratégies de conception par optimisation

A partir de ces axes, une représentation 3D peut être réalisée où le concept d'architecture d'optimisation se situe à l'origine. La Figure 3.9 schématise cette représentation adaptée à notre cas d'étude :

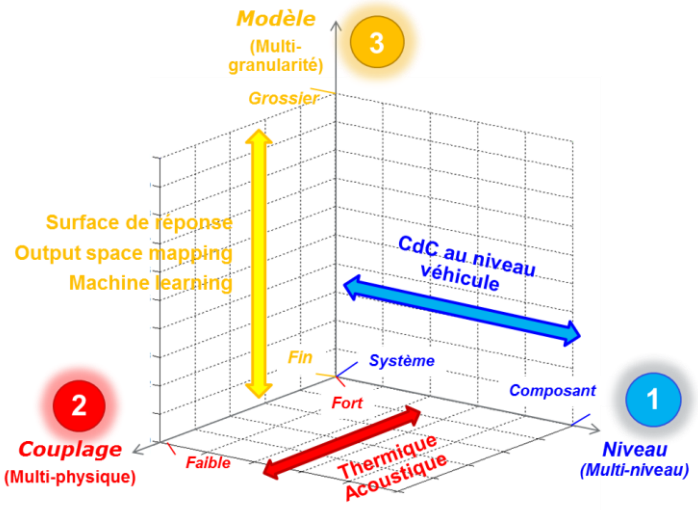


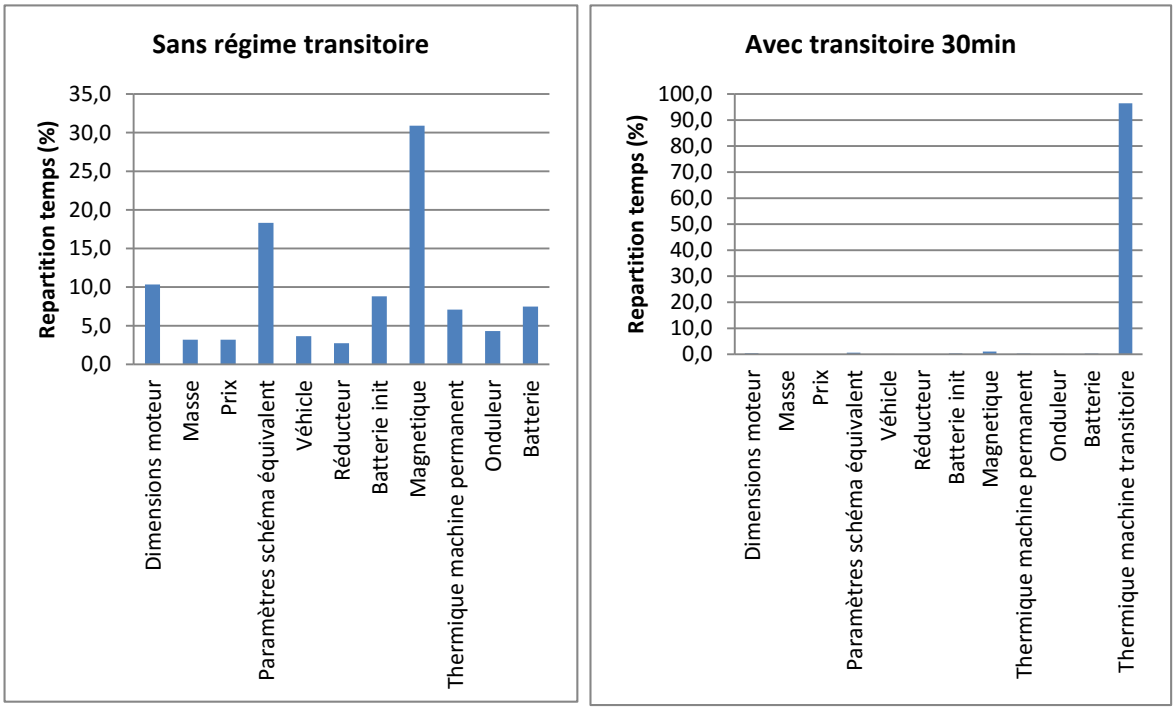
Figure 3.9 : Représentation 3D des axes de conception par optimisation

3.2 Analyse des temps de calcul

Au Chapitre 2, nous avons établi des hypothèses qui nous permettent d'exploiter un modèle système rapide afin de conserver un temps de calcul compatible avec une phase amont de développement dans le cadre d'une optimisation système multiphysique. Les principales hypothèses sont rappelées ici :

- Choix de modèles analytiques (2.1.1) ;
- Signaux électriques sinusoïdaux (2.1.2.1) ;
- Modèle magnétique moyen (2.1.2.2) ;
- Modèle de batterie résistif (2.1.2.3) ;
- Modèle mécanique statique (2.1.2.4) ;
- Causalité de la chaine de composant non respectée (2.1.3).

Une fois le modèle système mis en place, la simulation d'une géométrie sur un point de fonctionnement donne la répartition des temps de calcul de la Figure 3.10. Sur la Figure 3.10 (a), sans calcul transitoire thermique pour la machine électrique, le calcul est très rapide avec 0.003s, réparti assez équitablement entre les modèles à l'exception du modèle magnétique sensiblement plus long que les autres. Sur la Figure 3.10 (b), une simulation en thermique transitoire de 30min avec un pas de calcul de 1s représente plus de 95% du temps de calcul. Le temps de calcul est alors de 0.1s, soit environ 30 fois plus.



a) Sans thermique machine en transitoire : 0.003 s

b) Avec un régime transitoire de 30 min pour la thermique machine : 0.1 s

Figure 3.10 : Répartition du temps de calcul en fonction des modèles des composants

Bien que ces temps soient rapides, la simulation d'un cycle complet, en intégrant le contrôle de la machine et la thermique transitoire peut rapidement engendrer des temps de plusieurs dizaines de secondes. Avec une optimisation bi-objectif non linéaire sous contraintes, le nombre d'évaluations du modèle peut facilement dépasser 5000 appels, ce qui donne plus de 24 h pour une optimisation. Par ailleurs, l'évolution possible des modèles à l'avenir vers plus de détails est également un risque de forte augmentation des temps de calcul. Dans ce contexte, des stratégies ont été développées pour mettre en place une architecture pour l'optimisation afin de limiter les calculs au juste nécessaire. Les paragraphes qui suivent permettront de mettre en place une architecture globale pour conserver un temps de calcul acceptable. Il s'agira d'étudier :

- L'intégration du contrôle pour fixer les degrés de liberté du système sur les points de fonctionnement ;
- Les possibilités pour accélérer la simulation d'un cycle par la génération d'une cartographie de contrôle ou la simplification de ce cycle ;
- L'intégration de la thermique machine en régime permanent ou transitoire et la gestion du bouclage des températures ;
- L'intégration de modèles lourds en temps de calcul dans le processus d'optimisation afin de tenir compte de contraintes qui ne peuvent être calculées rapidement ;
- La correction automatique du modèle rapide par des modèles lourds pour simplifier le travail du concepteur : si finalement le dimensionnement obtenu n'est pas satisfaisant, il faudra refaire l'optimisation en modifiant certains paramètres.

3.3 Intégration du contrôle de la machine électrique

Le choix d'un contrôle énergétique pour une chaine de traction peut avoir beaucoup d'impact sur les temps de calcul et nécessite un travail spécifique pour être intégré dans une optimisation système. Les éléments de contrôle peuvent varier d'une chaine de traction à l'autre et peuvent être classés en deux catégories :

- Les éléments de contrôle ne dépendant pas d'un cycle de roulage, un choix optimal selon certains critères peut être fait pour chaque point de fonctionnement indépendamment des trajets à parcourir. Il s'agit par exemple :
    - Du contrôle de la machine électrique pour un véhicule électrique,
    - De la répartition du couple délivré par les machines électriques dans le cas d'un véhicule électrique avec plusieurs machines ;
- Les éléments de contrôle dépendant du cycle de roulage : le choix du contrôle optimal dépend de la suite du trajet à parcourir. Il s'agit par exemple :
    - De la gestion d'énergie sur un véhicule hybride,
    - Du choix du rapport engagé pour un véhicule thermique ou électrique,
    - Du choix du préchauffage d'un moteur thermique ou d'une batterie.

La deuxième catégorie peut être résolue par des algorithmes dédiés, en particulier la gestion d'énergie hybride est étudiée au travers de la programmation dynamique ou du principe de Pontryagin [DEHO14]. Pour notre chaine de traction électrique avec une machine unique et un réducteur fixe, le contrôle étudié est celui de la machine électrique.

En fonction du type de machine, le nombre de degrés de liberté pour le contrôle énergétique en régime permanent sur un point de fonctionnement est généralement d'un (par exemple un pour une machine asynchrone [CGHJ13], cf. Figure 2.26, ou deux pour une machine synchrone à rotor bobiné [JANI11]).

3.3.1 Comparaison des différents contrôles

Un contrôle classique pour une machine asynchrone est de garder le flux constant, ce qui signifie garder E/f constant sur toute la plage de fonctionnement, sauf dans la zone de défluxage quand la tension d'alimentation est maximale et la fréquence augmente pour atteindre des vitesses plus élevées. Or la grandeur E n'est pas directement accessible contrairement à V1 qui est finalement utilisée pour un contrôle V1/f (voir Figure 2.20). L'optimum pour minimiser les pertes consiste à faire varier le flux, en particulier le diminuer pour les faibles charges, c'est ce qui est fait sur les calculateurs des véhicules électriques. Dans le cadre de la conception par optimisation, différentes lois de contrôle vont être testées pour connaitre l'impact d'éventuelles simplifications qui permettraient d'accélérer le processus d'optimisation. Nous avons donc comparé trois lois de contrôle : E/f, V/f et Optimale pour la machine asynchrone sur des cartographies de rendement et sur des cycles de roulage [CGHJ13]. Pour un couple et une vitesse donnés, le degré de liberté choisi est la fréquence f pour notre machine asynchrone. De manière équivalente, nous aurions pu choisir E ou le glissement s. (voir paragraphe 2.2.3.2).

3.3.1.1 V/f constant

« V1/f=k1 » : le coefficient k1 sera gardé constant tant que la tension V1 ne dépasse pas la tension V1max qui est égale à Umot_max au coefficient de couplage (triangle, étoile) près. Notre modèle ayant E comme entrée et V1 comme sorti, nous avons utilisé un algorithme d'optimisation pour fixer V1/f constant en tous points de fonctionnement. Cela servira de base pour la comparaison, mais ne sera ni optimal d'un point de vue des pertes, ni intéressant d'un point de vue du temps de calcul. L'objectif de l'optimisation sera de minimiser la valeur absolue de V1/f-k1 pour avoir V1/f=k1. L'optimisation effectuée est la suivante :

$$\begin{aligned} \underset{f}{\text{Min}} \quad & \left|\frac{V_1(f)}{f} - k_1\right| \\ \text{Soumis à} \quad & g(f) \leq 0 \\ \text{avec} \quad & f_{min} = \frac{p\,\Omega_{mot}}{2\pi} \leq f \leq f_{max} = f_{min} + \Delta_f \end{aligned} \tag{3.2}$$

La fonction contrainte $g(f)$ comprend toutes les contraintes, dont la tension max V_{1max}, les températures et les densités de courant. f_{min} est une borne inférieure pour la variable fréquence, il s'agit de la fréquence de synchronisme. Δ_f est choisi suffisamment grand pour ne jamais être limitant pour le point optimal.

3.3.1.2 E/f constant

« E/f=k2 » : le coefficient k2 sera gardé constant tant que la tension V1 ne dépasse pas la tension V1max. Notre modèle ayant E comme entrée, il est possible de résoudre une équation du second ordre pour obtenir les f et E à partir de k2. Si on exprime le couple en fonction de k2, on obtient une équation du second ordre en f. Comme nous connaissons le couple C_{mot} désiré, nous pouvons résoudre l'équation :

$$C_{mot} = \frac{3 \times p \times E^2}{\omega_s} \times \frac{\frac{r_2'}{s}}{\frac{r_2'^2}{s} + x_2'^2} = f(\Omega_{mot}, k_2, f) = a \times f^2 + b \times f + c \tag{3.3}$$

Avec a, b, et c des coefficients dépendants de Ω_{mot} et k_2 qui sont connus. La résolution donne :

$$f = \frac{1}{4\,\pi\,C_{mot}\,l'_2}\,[3\,p\,k_2^2 r'_2 + 2\,T\,l'^2_2\,p\,\Omega_{mot} - \sqrt{\left(3\,p\,k_2^2 r'_2 + 2\,C_{mot}\,l'^2_2\,p\,\Omega_{mot}\right)^2 - 4\,C_{mot}\,l'_2\left(C_{mot}\,r'^2_2 + C_{mot}\,(l'_2\,p\,\Omega_{mot})^2 + 3\,p^2 k_2^2 r'_2\,\Omega_{mot}\right.} \tag{3.4}$$

On peut enfin déduire E par :

$$E = f \times k_2 \tag{3.5}$$

Lorsque la tension V1 calculée par le modèle dépasse V1max dans les zones de défluxage, le coefficient k2 est diminué par une boucle itérative par point. Cette boucle suit la logique suivante :

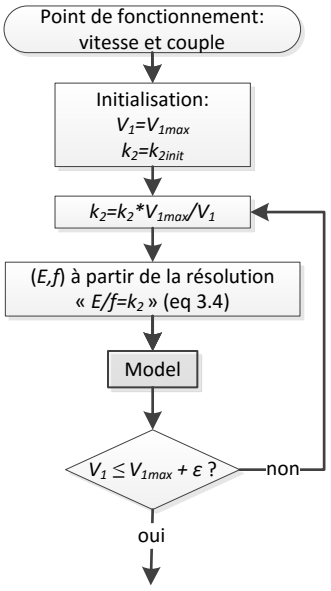


Figure 3.11 : Gestion du défluxage pour le contrôle $E/f=k_2$

Avec ε une petite erreur, par exemple 1% de V1max. Environ trois itérations suffisent à la convergence.

3.3.1.3 Optimale

La fréquence f est obtenue par un algorithme d'optimisation visant à minimiser les pertes de la machine.

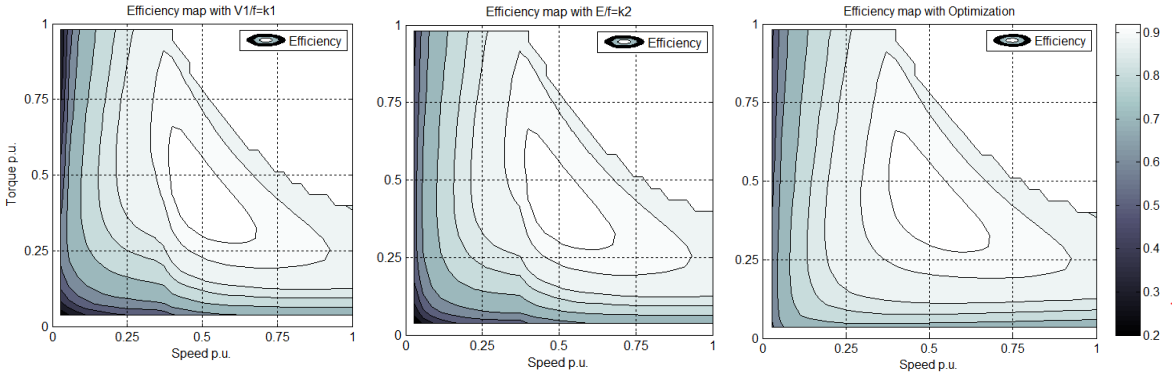
$$\begin{aligned} \underset{f}{\text{Min}} \quad & q_{mot}(f) \\ \text{Soumis à} \quad & g(f) \leq 0 \\ \text{avec} \quad & f_{min} \leq f \end{aligned} \tag{3.6}$$

La fonction contrainte $g(f)$ comprend toutes les contraintes, dont la tension max V_{1max}, les températures et les densités de courant. Pour pouvoir intégrer la contrainte de tension max, les modèles d'onduleur et de batterie doivent être simulés, ils sont donc inclus dans la boucle d'optimisation. Puisque ces modèles sont simulés, il est possible de considérer les pertes de l'ensemble [machine + onduleur + batterie] comme objectif d'optimisation plutôt que seulement les pertes de la machine, sans modifier le temps de calcul. Pour le cas d'étude du Twizy, les écarts de contrôle entre la minimisation des pertes de la machine ou des pertes de la chaine sont très faibles, environ 0,01 % quel que soit le point de fonctionnement. Le contrôle n'influe pas sur le réducteur qui n'est pas inclus dans la boucle. Ce problème à une variable a un minimum unique tel que présenté sur la Figure 2.26.

3.3.1.4 Comparaison et analyse

Pour les contrôles à flux constant, les coefficients k1 et k2 ne sont connus que pour la géométrie du Twizy. Lorsque la géométrie varie, notre modèle de comportement ne permet pas de donner

directement ces coefficients. Une boucle d'optimisation est lancée sur un point de fonctionnement à faible vitesse avec l'objectif de maximiser le couple. Cette optimisation permet d'obtenir les coefficients qui seront utilisés pour les autres points de fonctionnement. Comme pour le contrôle « Optim » et V1/f=k1, l'algorithme d'optimisation utilisé est SQP avec la fonction fmincon de MATLAB®. La dérivée symbolique n'est ici pas fournie à l'algorithme qui doit obtenir la dérivée par différence finie. Avec une seule variable, la convergence reste rapide avec 10 à 20 itérations.



a) *V1/f* b) *E/f* c) Optim

Figure 3.12 : Cartographie de rendement pour différents contrôles

La Figure 3.12 compare les cartographies de rendement de la machine électrique en fonction de la vitesse et du couple. Les axes sont normés par unité (p.u). On remarque les rendements sensiblement inférieurs pour les contrôles à flux constant aux bas couples. La cassure à la vitesse d'environ 0,35p.u s'explique par la tension maximum qui est atteinte. Ce comportement peut s'observer sur la Figure 3.13 qui trace les valeurs du coefficient E/f en fonction de la vitesse pour un couple=0,25p.u.

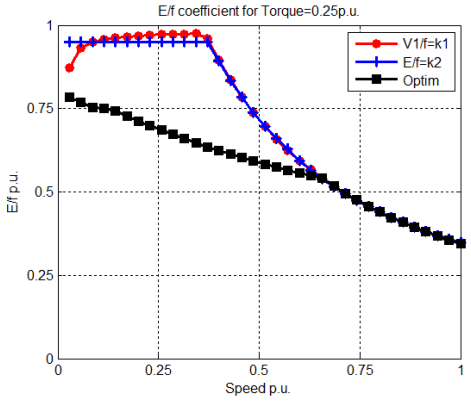
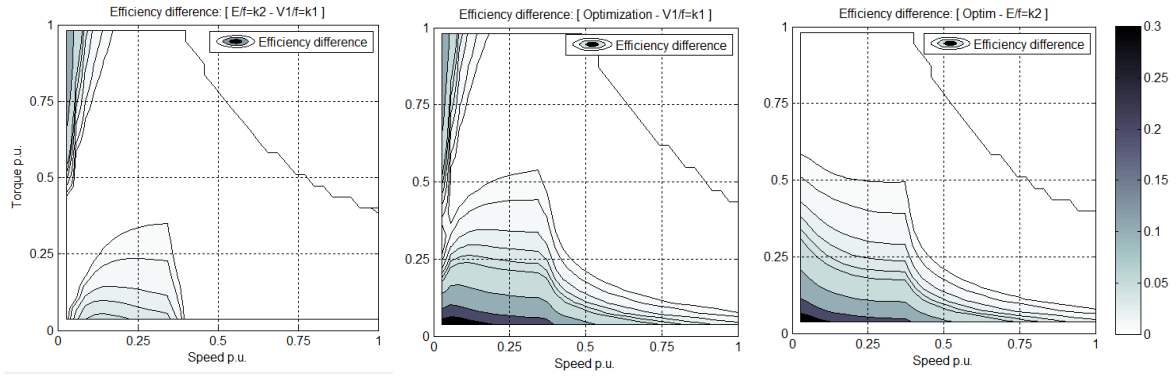


Figure 3.13 : Ratio *E/f* en fonction de la vitesse pour différents contrôles pour un couple=0.25

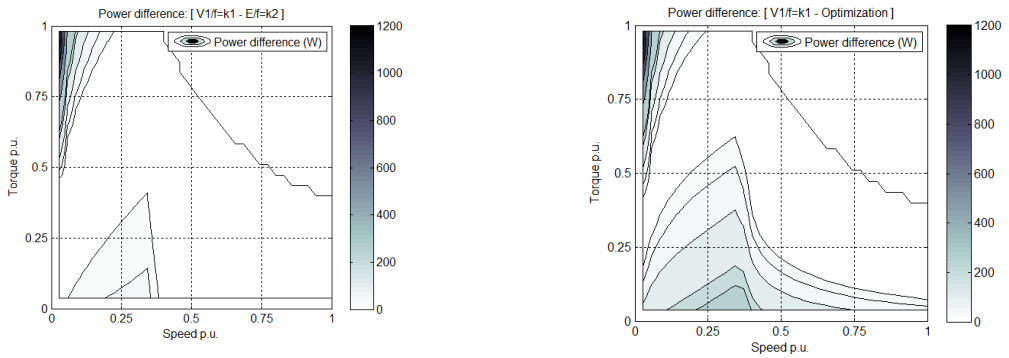
La différence entre V1/f et E/f est bien visible aux faibles vitesses ou la chute de tension explique les différences. Le flux optimisé est plus faible que les contrôles à flux constant comme espéré. Aux vitesses élevées, le contrôle est optimal lorsqu'il exploite le maximum de tension disponible à la machine, donc les trois contrôles sont équivalents. La Figure 3.14 représente la soustraction des cartographies de rendement pour observer les différences de performance.



a) *E/f-V₁/f* b) Optim-*V₁/f* c) Optim-*E/f*

Figure 3.14 : Comparaison des rendements en fonction du contrôle

Les écarts entre les contrôles peuvent atteindre 0.3 point de rendement aux plus faibles couples. Cependant à ces points, les puissances en jeu sont faibles. La comparaison a donc également été faite sur les pertes avec la soustraction des cartographies de pertes sur la Figure 3.15.

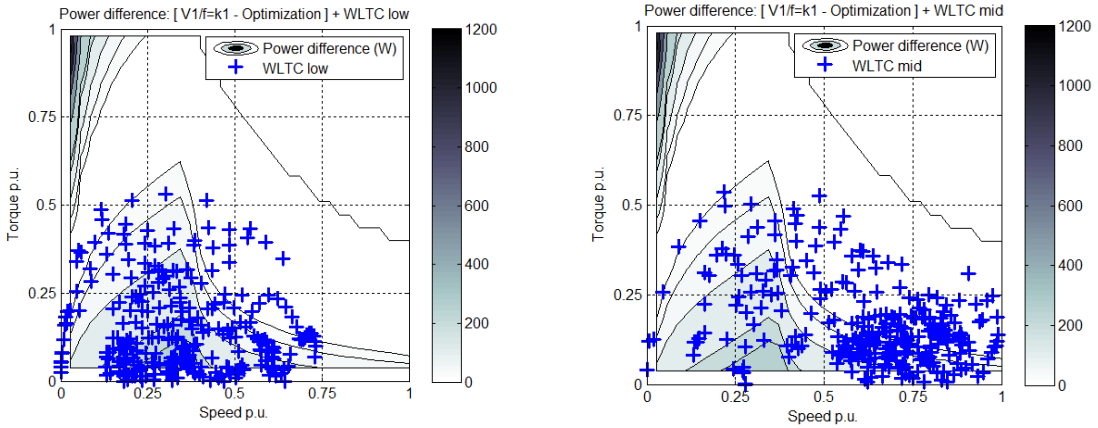


a) *V₁/f-E/f* b) *V₁/f*-Optim

Figure 3.15 : Écarts de pertes en fonction du contrôle

Les écarts sont compris entre 0 et 400 W pour les faibles couples, et peuvent atteindre 1200 W pour les valeurs de couples élevées et faibles vitesses.

Enfin la comparaison a été menée sur deux cycles de roulages : WLTC Bas et WLTC Moyen. Sur la Figure 3.16, les points de fonctionnement des cycles discrétisés à la seconde sont superposés à la cartographie d'écart de pertes pour déterminer si le contrôle va impacter la consommation sur ces cycles.



a) WLTC Bas b) WLTC Moyen

Figure 3.16 : Points de fonctionnement superposés à la cartographie d'écart de pertes

Le cycle WLTC Bas a la majorité de ses points de fonctionnement dans la zone ou l'écart est le plus important. Ces résultats se retrouvent chiffrés sur les écarts de consommation dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Comparaison des consommations en fonction du contrôle

Méthode	WLTC Bas	WLTC Moyen	Temps de calcul pour WLTC Moyen
$V_1/f=k_1$	100%	120.8%	21s
$E/f=k_2$	99.1%	120.5%	2s
Optim	88.1%	118.3%	20s

L'écart d'autonomie sur WLTC Bas atteint 12 points entre le contrôle V1/f et le contrôle optimisé. Il n'est que d'environ 2 points sur WLTC Moyen dont la majorité des points de fonctionnement ne sont pas impactés par le type de contrôle. Le nombre de points de fonctionnement non nuls sur le cycle WLTC Moyen discrétisé à la seconde est de 386 et donne un temps de calcul 10 fois plus long pour optimiser le contrôle de chaque point plutôt que d'appliquer un contrôle en E/f.

Cependant, l'impact est important sur l'autonomie et l'écart entre les contrôles n'est pas uniforme sur la plage de couple/vitesse, en particulier un contrôle en E/f ne donne pas la même importance aux points de fonctionnement à faible vitesse et couple. Nous décidons donc d'intégrer systématiquement une boucle d'optimisation sur le contrôle de la machine. La rapidité de résolution pourra être ajustée avec la précision de l'algorithme.

3.3.2 Cartographie de contrôle

Afin de réduire le temps de calcul du contrôle optimal, le calcul d'une surface de réponse a été étudié. Générer une cartographie du contrôle optimal peut venir pertinent pour simuler un grand nombre de points sur le cycle. Les variables influentes sur le contrôle en fonction du point de fonctionnement sont la vitesse, le couple, les températures bobinage stator et cage rotor, et la tension max disponible. La surface de réponses peut être calculée sur les sorties du modèle, courants, pertes, ou sur la fréquence du contrôle. Une telle surface de réponses requerra donc un nombre conséquent

de points à optimiser. Par exemple, la surface de la Figure 3.18 (a) est la fréquence optimisée en fonction du couple et de la vitesse. La surface a été obtenue avec une grille de 6 vitesses et 9 couples équirépartis, soit 54 points, tels que présenté sur la Figure 3.17.

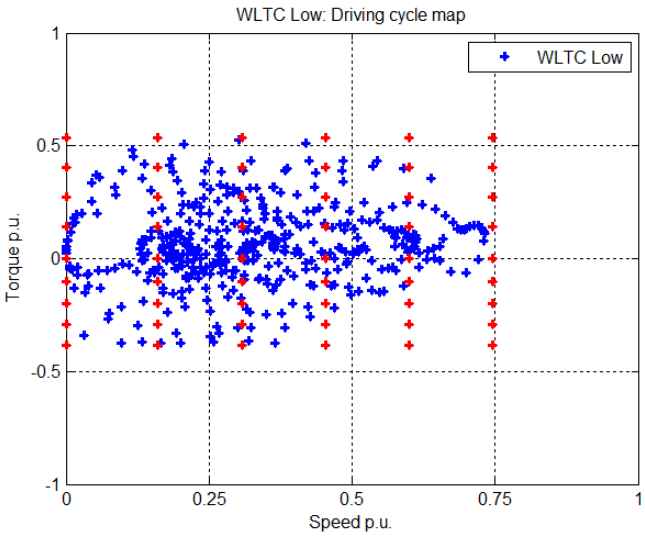
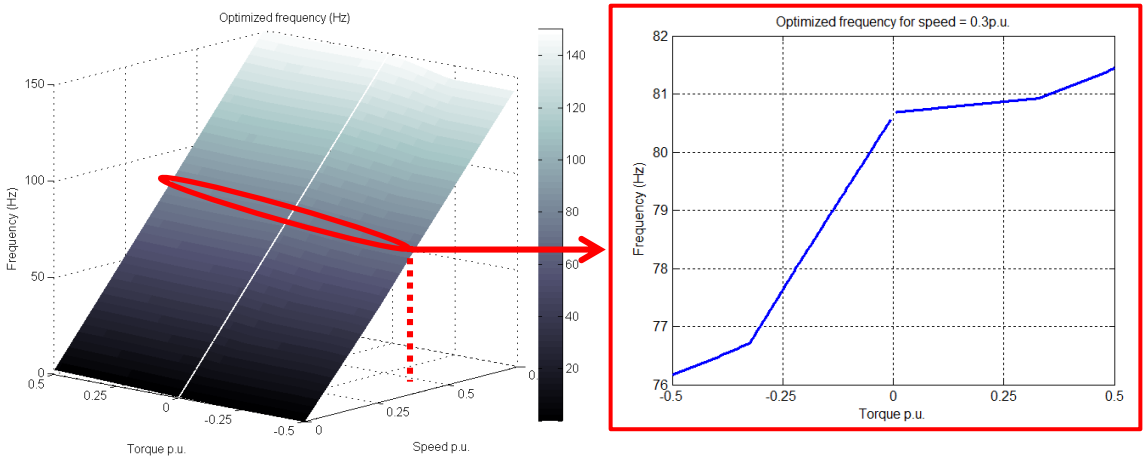


Figure 3.17 : Exemple de quadrillage en vitesse et couple pour obtenir une cartographie de contrôle

Bien que la surface ressemble à un plan sur la Figure 3.18 (a), les variations observables sur la Figure 3.18 (b) pour une vitesse donnée égale à 0.3 p.u. montrent qu'il n'est pas possible d'obtenir ce plan avec seulement 3 ou 4 points.



a) Cartographie de fréquence optimisée b) Fréquence optimisée pour vitesse=0.3

Figure 3.18 : Cartographie de la fréquence optimisée en fonction de la vitesse et du couple

Afin d'estimer l'erreur réalisée sur l'énergie consommée par les pertes de la chaine de traction en fonction du nombre de points utilisés pour générer la cartographie, le problème d'optimisation bi objectif suivant a été résolu:

$$\underset{v,c}{\text{Min}} \quad \left\{ \left| e_{cte}(v,c) - e_{cte\,optim} \right| \right._{v.c}$$

avec v: nombre de points sur la vitesse

c: nombre de points sur le couple

$e_{cte_{optim}}$: l'énergie consommée par les pertes de la chaine de traction sur le cycle dont le contrôle est optimisé en chaque point du cycle (3.7)

e_{cte}: l'énergie consommée par les pertes de la chaine de traction sur le cycle dont le contrôle provient de la cartographie de contrôle

Le résultat est obtenu par une recherche exhaustive, y compris les différentes combinaisons qui donnent le même nombre de points. La Figure 3.19 représente le front de Pareto de cette erreur en fonction du nombre de points pour générer la cartographie de contrôle utilisée pour une simulation sur le cycle WLTC Moyen. Les points de la courbe sont les meilleures combinaisons obtenues. La cartographie est générée à la tension batterie maximum et aux températures machines initiales. Si la tension disponible est plus faible que la tension obtenue à partir de la fréquence de la cartographie, le modèle sera simulé à nouveau à tension maximum disponible. Les deltas de températures de quelques degrés sur le cycle étudié impactent de manière négligeable le contrôle de la machine. Entre deux points de la cartographie, l'interpolation réalisée est linéaire.

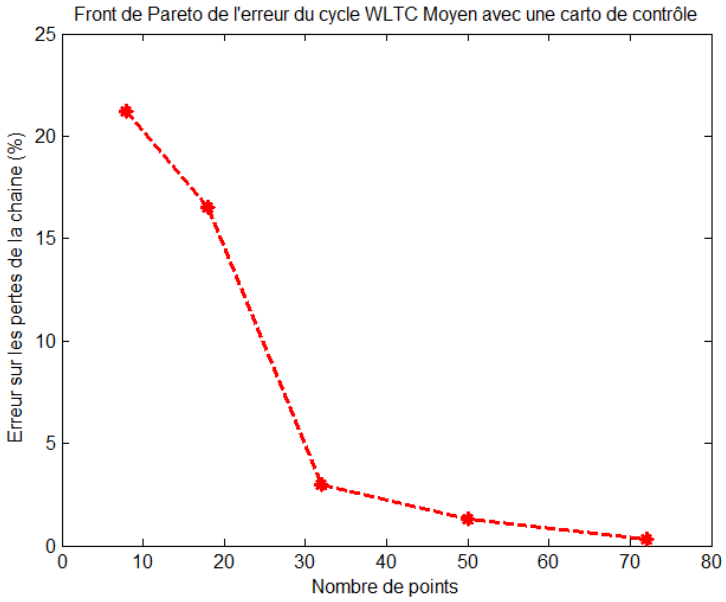


Figure 3.19 : Front de Pareto de l'erreur sur WLTC Moyen avec une cartographie de contrôle

Le nombre de points nécessaire pour obtenir une erreur inférieure à 5 % est environ de 30. Pour effectuer une simulation de cycles jusqu'à vider la batterie, soit par exemple 5000 secondes, donc 5000 points pour un cycle discrétisé à la seconde, utiliser une cartographie permettra de bien accélérer le calcul. Pour notre objectif de conception par optimisation, une autre possibilité pour accélérer les calculs est de simplifier le cycle en un nombre restreint de points représentatifs.

3.3.3 Simplification du cycle

Plutôt que de simuler un cycle entier, une possibilité pour réduire les temps de calcul pour la conception est de simplifier ce cycle en un certain nombre de points de fonctionnement représentatifs. Ce type de simplification peut se retrouver par exemple dans [KRCM12] ou [CHWL14]. Il s'agit dans le premier cas de diviser les points de fonctionnement en secteurs, et dans le second cas de conserver les points qui demandent le plus d'énergie. Nous avons choisi ici de découper l'ensemble des points en secteurs, puis de calculer un barycentre pour chaque secteur. Le modèle de véhicule est d'abord simulé pour obtenir l'ensemble des points dans le plan vitesse roue/couple roue. La Figure 3.20 représente un exemple de découpage en 10 points d'un cycle.

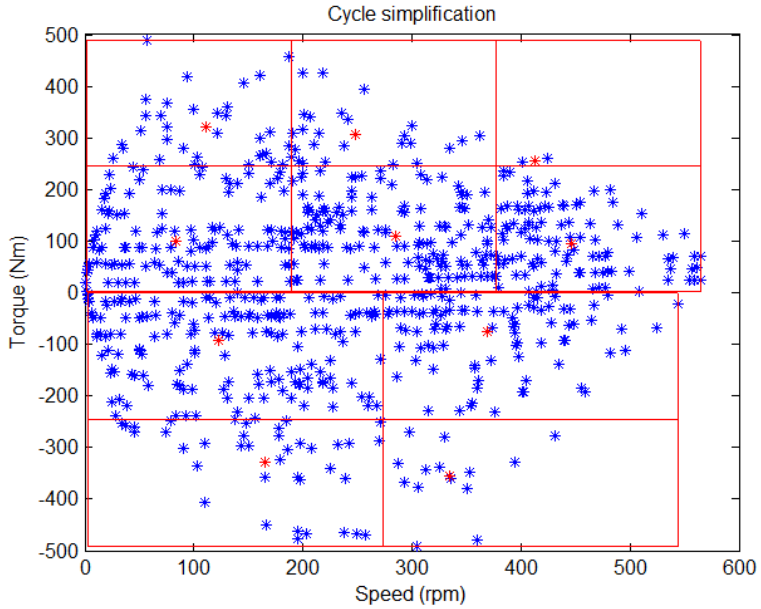


Figure 3.20 : Exemple de découpage d'un cycle

Le découpage peut être différent pour les couples positifs et les couples négatifs, comme ici avec 2x3 points positifs et 2x2 points négatifs. Chaque barycentre est obtenu par la moyenne des couples C_{moy} et des vitesses Ω_{moy} des points nb_p qui se trouvent dans un secteur.

$$C_{moy} = \frac{\sum_1^{nb_p} C_{roue}}{nb_p}$$
$$\Omega_{moy} = \frac{\sum_1^{nb_p} \Omega_{roue}}{nb_p} \quad (3.8)$$

Puis pour retrouver l'énergie représentant le cycle, un temps équivalent t_{eq} est calculé dans chaque secteur à partir de la somme des énergies dans le secteur :

$$t_{eq} = \frac{\sum_1^{nb_p} C_i \times \Omega_i \times t_i}{C_{moy} \times \Omega_{moy}} \quad (3.9)$$

Avec ce calcul, l'énergie totale nécessaire à la roue est précisément égale entre le calcul du cycle complet et le calcul simplifié. Pour déterminer l'erreur réalisée sur l'énergie consommée par les pertes de la chaine de traction, le problème d'optimisation bi objectif suivant a été résolu:

$$\underset{v_p,c_p,v_n,c_n}{\text{Min}} \quad \begin{cases} \left| e_{cte}(v_p, c_p, v_n, c_n) - e_{cte_{optim}} \right| \\ v_p . c_p + v_n . c_n \end{cases} \tag{3.10}$$

avec v_p : nombre de points sur la vitesse pour les couples positifs

c_p : nombre de points sur les couples positifs

v_n : nombre de points sur la vitesse pour les couples négatifs

c_n : nombre de points sur les couples négatifs

$e_{cte_{optim}}$: l'énergie consommée par les pertes de la chaine de traction sur le cycle dont le contrôle est optimisé en chaque point du cycle

e_{cte} : l'énergie consommée par les pertes de la chaine de traction sur les points barycentres

Le résultat est obtenu par une recherche exhaustive. La Figure 3.21 représente ce front de Pareto de l'erreur en fonction du nombre de points utilisés pour simplifier le cycle WLTC Moyen.

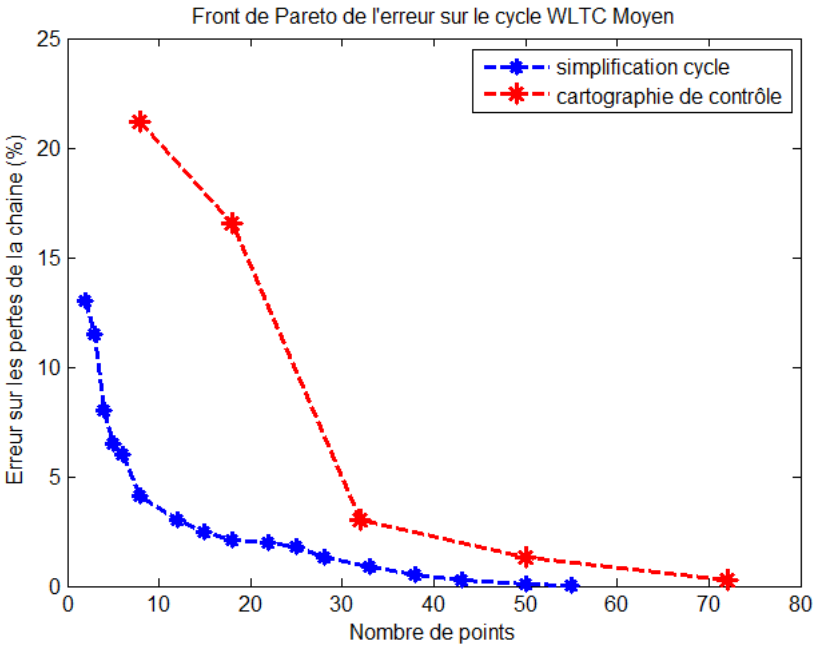


Figure 3.21 : Front de Pareto de l'erreur sur le cycle WLTC Moyen par simplification et cartographie

Six points sont suffisants pour avoir une erreur inférieure à 5 % sur l'estimation des pertes de la chaine. Ce résultat est plus intéressant que l'erreur commise en utilisant une cartographie de contrôle dont la courbe est rappelée sur la Figure 3.21.

La méthode de simplification du cycle sera conservée pour l'architecture d'optimisation. Cette simplification ne permettra donc plus de simuler l'évolution des grandeurs pendant le cycle : courant, température, état de charge, etc. Il faudra vérifier au préalable que le cycle utilisé pour estimer l'autonomie n'est pas une contrainte pour la chaine de traction : ni pour les performances, ni pour la thermique, puisque les points extrêmes du cycle ne seront pas simulés pendant l'optimisation. C'est généralement le cas pour un cahier des charges de véhicule où des points performances sont spécifiés en plus du cycle. Le nombre de points de simplification du cycle sera nommé pc par la suite avec $pc = v_p.c_p + v_n.c_n$.

3.3.4 Biniveau ou mononiveau

À ce stade, nous avons des points de fonctionnement dont le contrôle est optimisé pour chacun :

- Les quelques points du cycle simplifié, nommés *pc*, pour formuler l'objectif « autonomie » du problème. On ne cherche plus à simuler ces points dans l'ordre temporel du cycle, ils sont indépendants ;
- Les quelques points du cahier des charges de performances véhicule, nommés *pp*, comme grimper une pente de garage ou rouler sur l'autoroute. La terminologie « performance » se réfère uniquement aux performances véhicules qui sont vues comme des contraintes pour le problème d'optimisation, on cherche uniquement à vérifier que ces points peuvent être atteints. L'optimisation du contrôle permet donc de vérifier que ces points sont atteignables en respectant les contraintes, l'objectif de cette optimisation peut être quelconque. Ces points sont également indépendants.

Dans ce cas particulier, maximiser l'autonomie du véhicule implique nécessairement d'avoir le minimum de pertes en chaque point. L'objectif du contrôle est inclus dans l'objectif global de l'optimisation. Ce constat n'est plus valable si l'objectif global est de minimiser le cout de la chaine, ou si l'objectif du contrôle est de minimiser les oscillations de couple (pour une machine à réluctance variable par exemple). Pour ce cas particulier, la stratégie d'optimisation peut être modifiée : l'optimisation du contrôle peut être envisagée dans la même boucle d'optimisation que l'optimisation des variables géométries, on passe alors d'une stratégie « bi-niveaux» avec des optimisations imbriquées, à une stratégie « mono-niveau » avec une unique optimisation [CGHR14]. Les deux stratégies ont été comparées sur un test pour déterminer si le temps de calcul pouvait être amélioré. Ce changement oblige par ailleurs à utiliser le même algorithme d'optimisation pour la géométrie et le contrôle. Le nombre de variables de l'optimisation géométrique se trouve augmenté d'autant de fréquences de contrôle qu'il a y a de points de fonctionnement pour le cycle et les contraintes pc+pp. Le problème biniveau s'écrit :

$$\begin{aligned} \min_{x} \quad & -autonomie(x, f_i^*) \\ \text{Soumis à} \quad & g(x, f_i^*) \leq 0 \\ \text{avec} \quad & x = \text{variables géométriques} \\ & f_i^* = \text{contrôle optimal obtenu avec (3.6)} \\ & i = [1, \dots dp + pp] \end{aligned} \tag{3.11}$$

Avec des boucles d'optimisation imbriquées, la convergence de la boucle géométrique dépend de celle des boucles de contrôle. Le problème mononiveau s'écrit :

$$\begin{aligned} \underset{x,f_i}{\text{Min}} \quad & -autonomie(x, f_i) \\ \text{Soumis à} \quad & g(x, f_i) \leq 0 \\ \text{avec} \quad & x = \text{variables géométriques} \\ & f_i = \text{variables de contrôle} \\ & i = [1, \ldots dp + pp] \end{aligned} \tag{3.12}$$

Cette formulation offre la possibilité de simuler tous les points de fonctionnement avec un vecteur de taille $dp + pp$. Avec la programmation sous Matlab®, le calcul vectoriel permet d'avoir un temps de calcul bien plus rapide qu'une boucle « for ». La comparaison des deux architectures est résumée sur la Figure 3.22. Les modèles des composants sont représentés par leurs images. Le cycle est ici simplifié en pc=4 points pour l'exemple. Le cahier des charges performance est de pp=3 points : gravir une pente, l'accélération maximale et atteindre la vitesse maximale. Cycle et performances sont les mêmes pour les deux formulations. Les boucles d'optimisation sont représentées par des cadres en pointillés, avec leurs variables, objectif et contraintes respectifs. Les cadres en ligne continue ne représentent qu'un appel au modèle qu'ils contiennent.

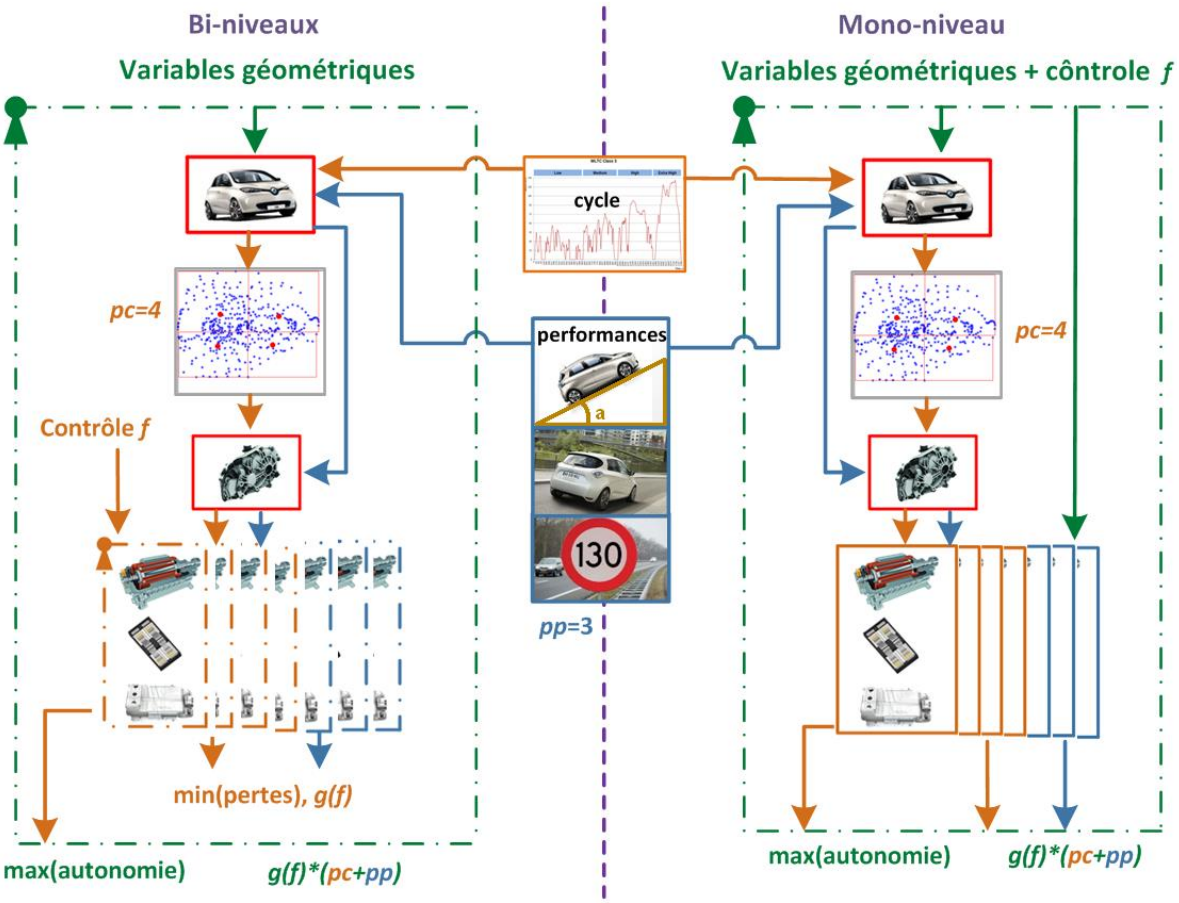
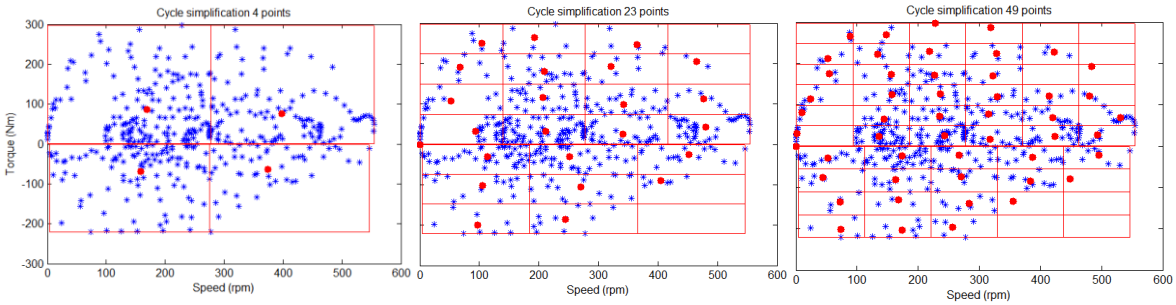


Figure 3.22 : Comparaison biniveau et mononiveau

Une comparaison a été faite avec le cas test d'une optimisation de la géométrie de la machine avec les 9 variables suivantes : longueur de fer, hauteur et largeur des encoches stator et rotor, épaisseurs de culasse rotor et stator, entrefer, et nombre de spires. L'algorithme utilisé pour les boucles d'optimisation de contrôle et de géométrie est SQP. Comme l'algorithme SQP fait partie des méthodes par gradient, il requiert que les variables soient continues. Le nombre de spires est donc rendu continu dans cet exemple. Pour éviter les optima locaux de l'optimisation géométrie, 50 points initiaux sont lancés, avec la fonction multistart de Matlab®, ces optimisations peuvent être calculées en parallèle. Pour l'optimisation du contrôle, un point initial suffit. Pour cette comparaison, 3 simplifications du cycle WLTC Bas ont été considérées : pc = 4, pc = 23 et pc = 49 (Figure 3.23).



a) *pc = 4* b) *pc = 23* c) *pc = 49*

Figure 3.23 : Simplifications de cycle considérées

Avec ces 3 simplifications, et l'étude bi ou mononiveau, on obtient 6 configurations résumées dans le Tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Les 6 configurations étudiées

	Nombre de variables géométriques	**Simplification du cycle *pc***	**Cahier des charges performance *pp***	**Nombre de variables pour l'optimisation globale**	**Abréviation**
Mononiveau	9	4	3	16	Mono 7
		23		35	Mono 26
		49		61	Mono 52
Biniveaux		4		9	Bi 7
		23			Bi 26
		49			Bi 52

Pour toutes les configurations, plus de 45 sur les 50 points initiaux ont convergé vers des résultats respectant les contraintes. La Figure 3.24 représente les valeurs de la fonction objectif en fonction des points initiaux, classés du meilleur résultat au moins bon :

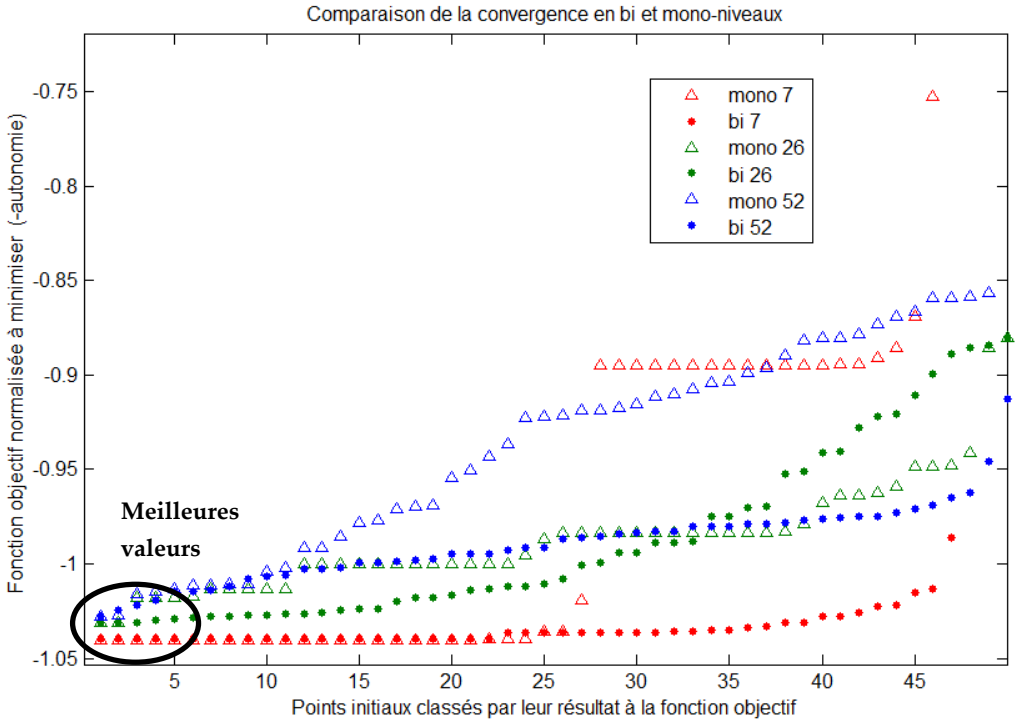


Figure 3.24 : Comparaison de la convergence en bi et mononiveau

Les configurations avec pc = 4 convergent beaucoup mieux que les autres cas : Presque 50% des points initiaux donnent le même meilleur optimum, ce pourcentage sera nommé taux de convergence dans la suite. Pour les configurations pc = 23 et pc = 49, seulement un ou deux points initiaux ont le même meilleur résultat, ce qui ne garantit pas un optimum global. La stratégie mono ou biniveau ne semble pas impacter le nombre de meilleurs résultats obtenus. La plus grosse différence vient des temps de calcul reportés dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Comparaison des temps de calcul sur les 6 configurations

Configuration	Temps de calcul (min)	Taux de convergence	Nombre moyen d'appels au modèle	Temps moyen du modèle (s)
Mono 7	3	48 %	800	0.0045
Mono 26	9	4 %	2000	0.0054
Mono 52	28	4 %	5000	0.0066
Bi 7	179	46 %	300	0.72
Bi 26	388	6 %	400	1.16
Bi 52	853	2 %	400	2.56

Le nombre d'appels moyen au modèle est le nombre de simulations du modèle système complet. La moyenne est celle des 50 points initiaux. Grâce à un modèle beaucoup plus rapide, la stratégie mononiveau est 30 à 50 fois plus rapide que la stratégie biniveau pour un taux de convergence similaire. Ces résultats démontrent qu'avec les mêmes modèles et algorithmes d'optimisation, la stratégie du problème peut avoir un impact fort, en particulier sur le temps de calcul. Comme pour toute optimisation, les tolérances choisies pour les critères d'arrêt de la fonction fmincon de Matlab® peuvent beaucoup changer les résultats. Avec l'optimisation du contrôle séparé, la stratégie biniveau

offre plus de possibilités pour ajuster ces valeurs. D'autres comparaisons ont été effectuées avec différents jeux de tolérances pour la boucle de contrôle et la boucle géométrique, mais la tendance est conservée : la stratégie mononiveau est bien plus rapide sur cet exemple. La Figure 3.25 représente les valeurs normalisées des variables du meilleur résultat en fin d'optimisation pour chaque configuration.

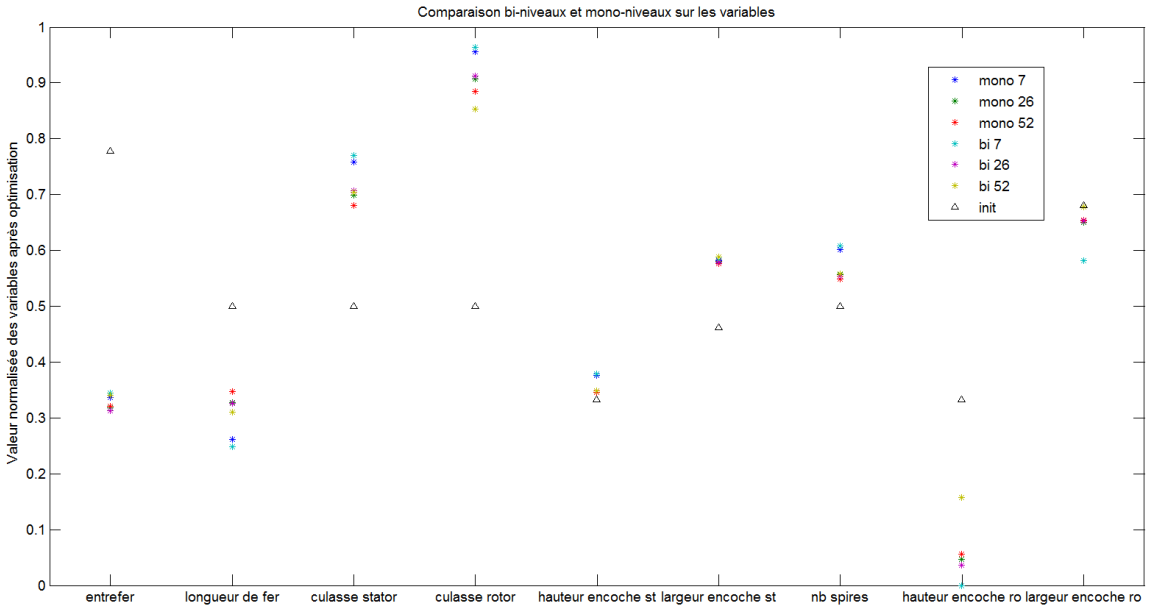


Figure 3.25 : Comparaison biniveau et mononiveau sur les valeurs obtenues pour les variables après optimisation

Toutes les valeurs obtenues ne sont pas précisément les mêmes, mais sont globalement assez proches et les machines conçues sont similaires. Le cout de la machine a été contraint à la même valeur que le cout de la géométrie initiale du Twizy, pour toutes les configurations. Ces 6 résultats ont été simulés sur le cycle WLTC Bas complet sans simplification et les autonomies sont très proches :

- L'autonomie de la géométrie initiale est améliorée de ~2.5 % pour les 6 configurations à cout égal ;
- L'écart d'autonomie entre la plus mauvaise configuration (bi 7) et la meilleure (mono 52) est de 0.1 %.

Ces résultats démontrent la pertinence de la simplification du cycle en un nombre limité de points pour l'optimisation de l'autonomie: les géométries obtenues par une optimisation avec pc=4 et pc=52 donnent quasiment la même autonomie sur le cycle simulé sans simplification.

3.4 Intégration de la thermique

Au même titre que le contrôle, l'intégration de modèles thermiques dans l'optimisation est un élément à fort impact sur les temps de calcul. Pour un cahier des charges de véhicules, on peut distinguer 3 catégories de contraintes thermiques :

- Les points de fonctionnement aux performances maximum à tenir quelques secondes, comme le franchissement d'une pente de garage ou une phase de dépassement. Ces points

peuvent être simulés avec un modèle de thermique adiabatique, en négligeant le refroidissement des composants ;

- Les cycles intermédiaires à tenir quelques dizaines de minutes, comme la montée d'une route de montagne. Ces points ou cycles nécessitent un modèle de thermique transitoire ;
- Les points continus, représentatifs d'un roulage ville, route ou autoroute. Ces points peuvent être simulés en régime permanent.

Or une simulation transitoire de 30min avec un pas de temps d'une seconde multiplie par ~25 le temps de calcul du modèle système.

Il apparait donc pertinent de réaliser une étude thermique préalable à l'optimisation sur un cahier des charges exhaustif pour déterminer les points les plus contraignants. Sur le cas d'étude du Twizy, des contraintes de performances pour 30 s, 30 min et en continues ont été simulées. La Figure 3.26 représente les 3 courbes de performances dans le plan vitesse véhicule / couple roue.

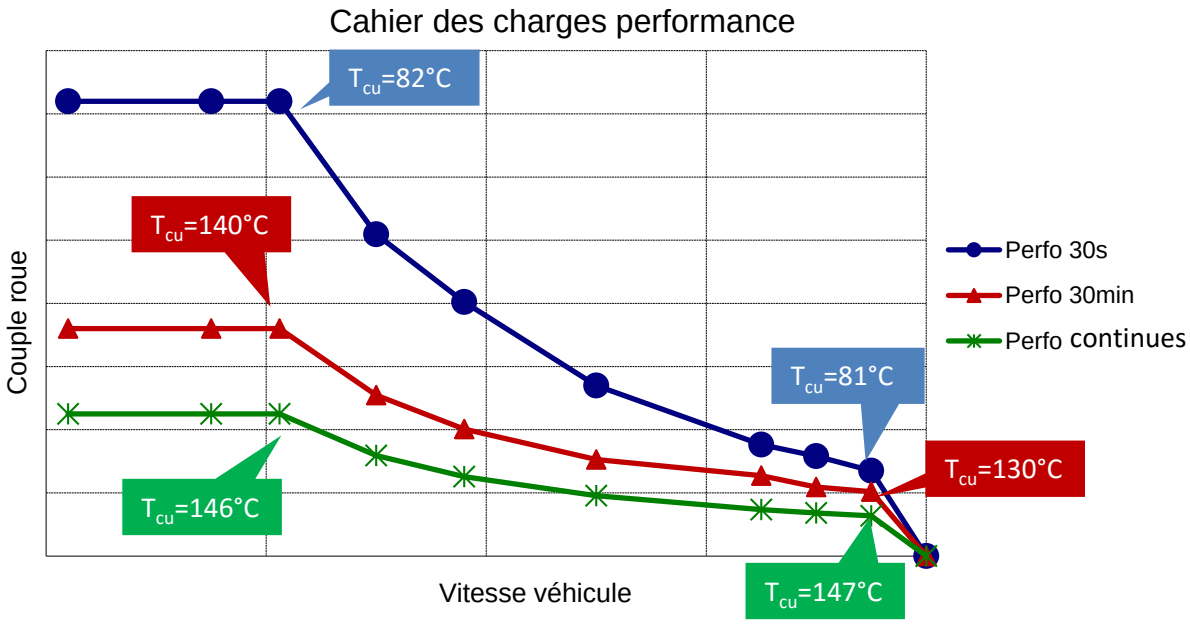


Figure 3.26 : Simulations thermiques sur un cahier des charges représentatif pour les performances

Le modèle thermique a été simulé sur 6 points des courbes pour lesquels la température du cuivre stator est indiquée. Pour ces 6 points, cette température est celle qui est la plus proche de sa contrainte. Les simulations 30 s et 30 min commencent à la température ambiante de 40 °C. On observe que le point le plus contraignant, avec Tcu = 147 °C, est à la vitesse maximale sur la courbe de performances continues, en régime permanent. Avec ce constat, il est possible d'envisager de ne pas faire de simulations transitoires pendant l'optimisation. Une fois la géométrie optimale obtenue en un temps raisonnable, les points en thermique transitoires peuvent être simulés pour vérifier que la température maximum n'est pas dépassée. Si les contraintes thermiques sont dépassées, la limite de température en régime permanent utilisée dans l'optimisation peut être abaissée manuellement ou itérativement.

3.5 Gestion des bouclages

Plusieurs boucles algébriques sont présentes dans notre modélisation. Leur résolution peut s'effectuer avec différentes stratégies détaillées ici.

3.5.1 Bouclage sur la thermique machine en régime permanent

Les modèles électromagnétique et thermique sont interdépendants : il faut la température pour calculer les pertes et les pertes pour calculer la température. Dans le modèle électromagnétique, deux températures influent sur les pertes : la température de la cage d'aluminium au rotor et la température du cuivre au stator. Le bouclage se fait donc sur ces températures. Il peut être géré au sein du modèle, par une stratégie de type MDF (défini en 3.1.3.3), ou par l'algorithme d'optimisation, par une stratégie IDF. Les deux cas ont été testés sur un cas d'étude pour comparer les temps de calcul. La Figure 3.27 représente le cas MDF où le bouclage est géré dans le modèle par une méthode de point de fixe : tant que |Tout-Tin|> ΔT, alors Tin=Tout. Les températures influent également sur le modèle thermique en modifiant les caractéristiques de conduction thermique des matériaux.

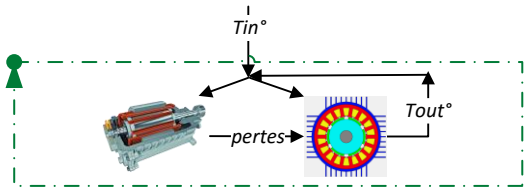


Figure 3.27 : Stratégie MDF pour le bouclage thermique

Pour un ΔT fixé à 1 °C, la convergence se fait en 2 à 10 itérations en fonction des points de fonctionnements et des géométries étudiées. La Figure 3.28 est un exemple de convergence des températures au fil des itérations, avec une température initiale de 70 °C pour toutes les parties de la machine.

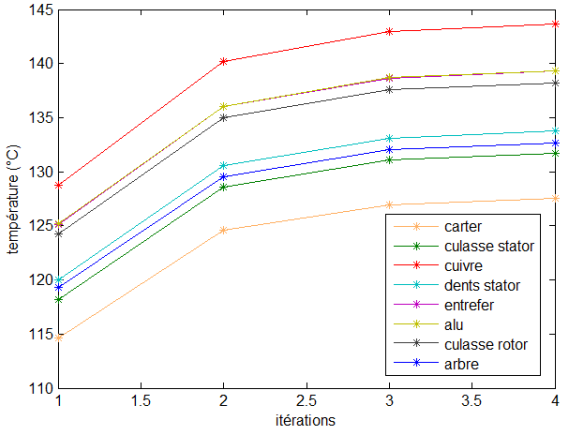


Figure 3.28 : Évolution des températures avec les itérations pour une température initiale de 70 °C

La Figure 3.29 représente le cas IDF où le bouclage est géré par l'optimiseur : les températures d'entrée Tin deviennent des variables d'optimisation et une contrainte d'égalité est ajouté entre Tin et Tout.

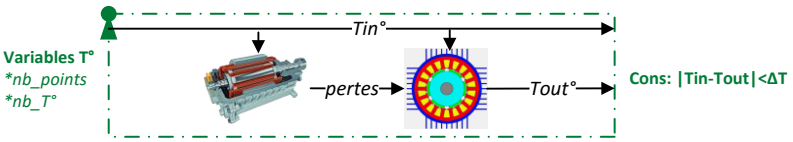


Figure 3.29 : Stratégie IDF pour le bouclage thermique

Dans cette configuration, la tolérance sur la contrainte est celle choisie pour l'algorithme d'optimisation. La comparaison des deux stratégies a été faite sur un cas test avec

- 21 variables géométriques (réducteur, machine, batterie) ;
- 4 points pour le cahier des charges performances, dont 2 avec une contrainte thermique en continu qui feront appel au modèle thermique en régime permanent ;
- 4 points de cycle simplifié pour l'objectif de maximiser l'autonomie.

Le contrôle est géré en mononiveau, qui donne 8 variables supplémentaires. La stratégie IDF donne 2 variables supplémentaires (Tcu et Talu) par points de fonctionnement à simuler en thermique. L'algorithme utilisé est active-set de la fonction fmincon de MATLAB®. Cet algorithme permet de fixer une tolérance absolue sur les contraintes, contrairement à SQP qui fixe une tolérance relative. Cette tolérance absolue a été choisie à 1 pour être la même que l'écart accepté $\Delta T = 1$ °C de la stratégie MDF. Le Tableau 3.4 résume les résultats de la comparaison sur une optimisation :

Tableau 3.4 : Comparaison MDF/IDF sur le bouclage thermique

	MDF	**IDF**	**Écarts**
Nb d'itérations thermique	Entre 2 et 10, $\Delta T < 1$ °C	1	
Nb de variables	21 + 8	21 + 8 + 2 * 2	
Nb de contraintes d'inégalité	55	55	
Nb de contraintes d'égalité	0	16, $\Delta T < 1$ °C	
Nb d'appels au modèle	1226	2049	+67 %
Temps de l'optimisation (s)	15.6	18.3	+17 %
Temps moyen par appel (s)	0.0152	0.0089	-41 %
Valeur fonction objectif	-1.0485	-1.0485	0

Les écarts obtenus entre les 2 stratégies sont assez faibles, l'optimisation par la stratégie MDF a été 17 % plus rapide qu'avec la stratégie IDF. Ce résultat s'explique par le fait que les modèles électromagnétiques et thermiques ne représentent qu'une partie du modèle système complet, donc retirer le bouclage de ces modèles sur eux-mêmes réduit moins le temps de calcul du modèle complet (-41 %) qu'il augmente le nombre d'itérations nécessaire à l'optimisation (+67 %). Il suffirait d'un modèle électromagnétique ou thermique un peu plus lent pour que la stratégie IDF devienne plus intéressante sur cet exemple.

3.5.2 *Bouclage onduleur et batterie*

Ce résultat sur la thermique machine permet également de faire un choix sur la gestion des autres bouclages du modèle système visibles sur la Figure 3.30 :

- Le bouclage de la thermique onduleur en régime permanent, en stratégie MDF.
- Le bouclage sur la tension batterie : la tension batterie est nécessaire au modèle d'onduleur pour calculer le courant batterie qui permet d'avoir la tension batterie. Comme pour la thermique, ce bouclage se fait sur des modèles rapides qui ne justifient pas d'utiliser une stratégie IDF avec une variable supplémentaire pour chaque point de fonctionnement

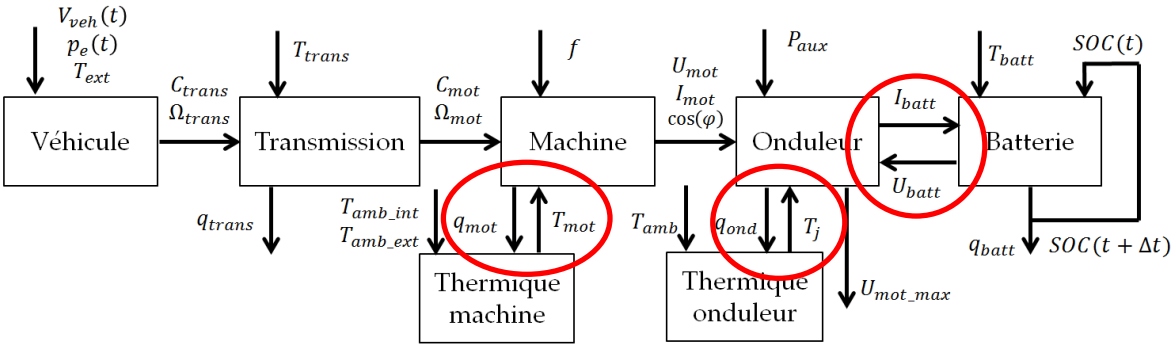


Figure 3.30 : Bouclages sur le modèle système

3.5.3 *Bouclage sur les masses*

Un bouclage est présent sur la masse véhicule : la masse des composants est nécessaire au modèle de véhicule pour calculer la puissance maximum du réducteur et de l'onduleur qui permettent de calculer leurs masses. La puissance maximum sera donnée par un des points performances. Il faudrait donc simuler les modèles véhicule, transmission et machine sur ce point pour connaitre les puissances maximums nécessaires au calcul de la masse du réducteur et de l'onduleur. Or la question du contrôle se pose à nouveau pour le modèle de la machine. Puisque les modèles de masses sont des 1ères approximations, il est inutile de perdre du temps à optimiser le contrôle de la machine pour cette boucle algébrique. A la place, la machine a été remplacée par une valeur de rendement unique tel que présenté sur la Figure 3.31. Ce calcul s'effectue avant la simulation complète des points pp et pc.

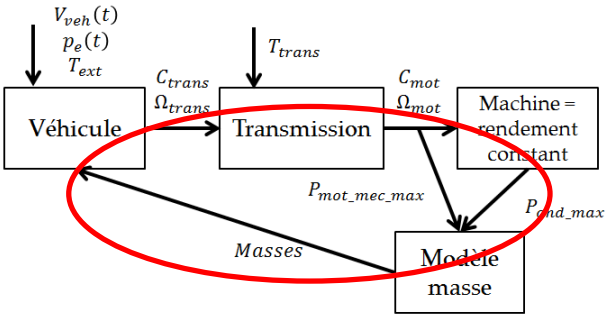


Figure 3.31 : Bouclage sur la masse

Deux itérations suffisent à avoir un écart de moins de 0.1 kg sur la masse calculée entre ces itérations. Tous les bouclages sont finalement gérés en stratégie MDF.

3.6 Prises en compte de contraintes physiques supplémentaires

L'intégration de certaines contraintes nécessite l'utilisation de modèle plus lourd. C'est le cas par exemple des calculs de bruit et des à-coups de couples, provoqués principalement par la machine électrique à cause de forces magnétomotrices non sinusoïdales. On parle alors d'oscillations de couple pour la machine. Notre modèle magnétique limité au 1er harmonique ne permet pas de simuler ces phénomènes. Des modèles semi-analytiques ou numériques sont donc utilisés [BESN08][FAKA14]. La topologie des machines (nombres d'encoches et de pôles) a une grande influence sur ces contraintes. Même si un bon choix de topologie ne garantit pas que les contraintes de bruit ou d'oscillations seront respectées, il permet de limiter les risques. Dans le cas d'un pré dimensionnement rapide, la solution la plus courante consiste donc à repartir de topologies préalablement étudiées et reconnues pour être parmi les meilleurs [LISO04]. Pour ce travail, nous avons cherché à intégrer ces contraintes en libérant l'espace des possibilités, sans nous restreindre à quelques topologies. Le modèle éléments finis de la machine sera donc utilisé sans être intégré directement dans une boucle d'optimisation pour ne pas augmenter exagérément les temps de calcul. Il s'agira donc d'utiliser une technique multigranularitée qui apportera un complément au modèle analytique par des simulations éléments finis, et plus exactement de rajouter une contrainte (oscillation de couple ou de bruit), calculée par éléments finis, à l'optimisation analytique, tel que présenté sur la Figure 3.32.

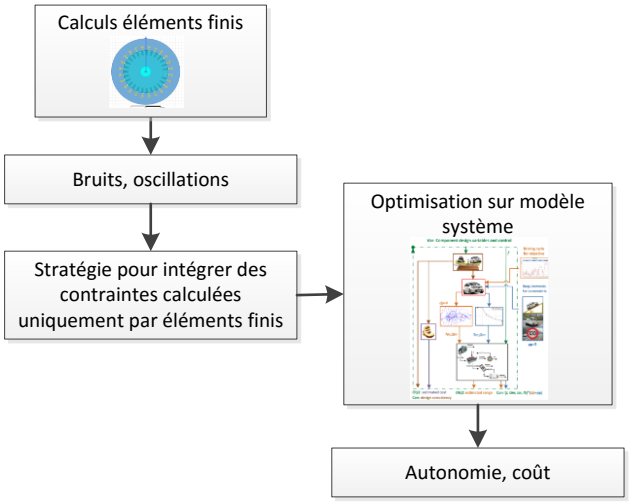


Figure 3.32 : Calculs d'éléments couteux en temps de calcul fait en dehors de l'optimisation système

3.6.1 Méthode avec une surface de réponse classique

Pour ajouter une contrainte calculée par éléments finis à l'optimisation analytique, l'idée naturelle est de faire une surface de réponse à partir de quelques simulations. Les surfaces de réponses sont obtenues à partir de modèles polynomiaux ou de Kriging qui reliront les points par une courbe continue comme dans la Figure 3.3 présentée dans l'état de l'art sur l'optimisation. Or l'influence de la topologie de la machine sur les contraintes étudiées est fortement discontinue.

Prenons comme exemple l'oscillation de couple calculée comme l'écart entre le maximum et le minimum de couple autour du couple moyen désiré, sur un point de fonctionnement considéré critique pour ce critère. La Figure 3.33 représente le ratio oscillation de couple sur le couple moyen en pourcentage en fonction du nombre d'encoches rotor Qr et de l'épaisseur d'entrefer ε normés entre 0 et 100 pour les 2 variables. Ces deux variables ont été choisies pour tester la méthode et fournir une représentation graphique. La figure a été obtenue en simulant une vingtaine de Qr et une dizaine de ε.

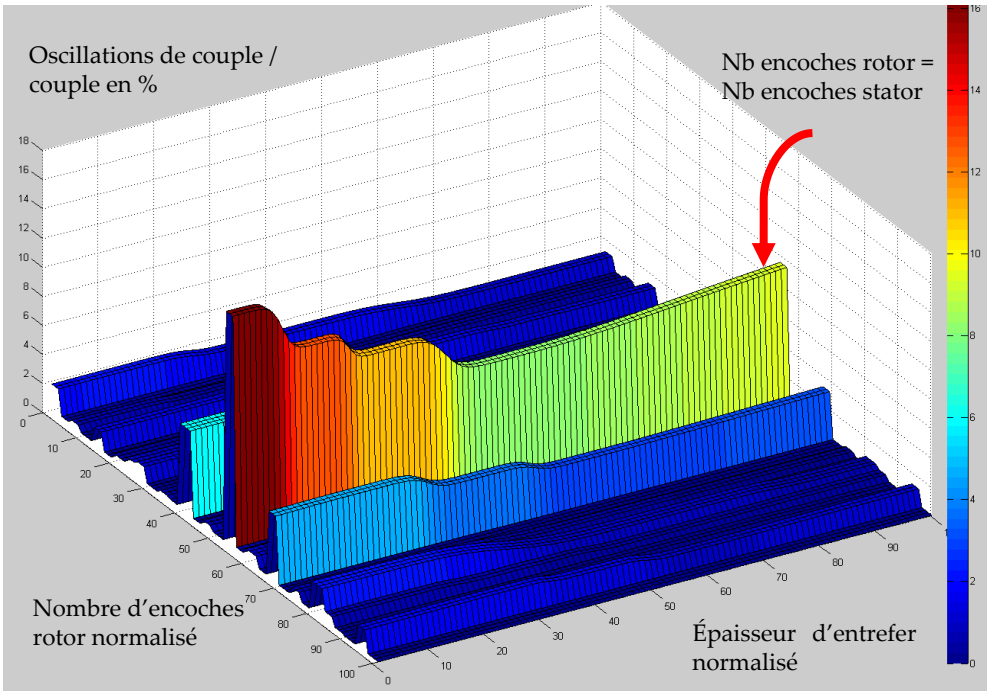
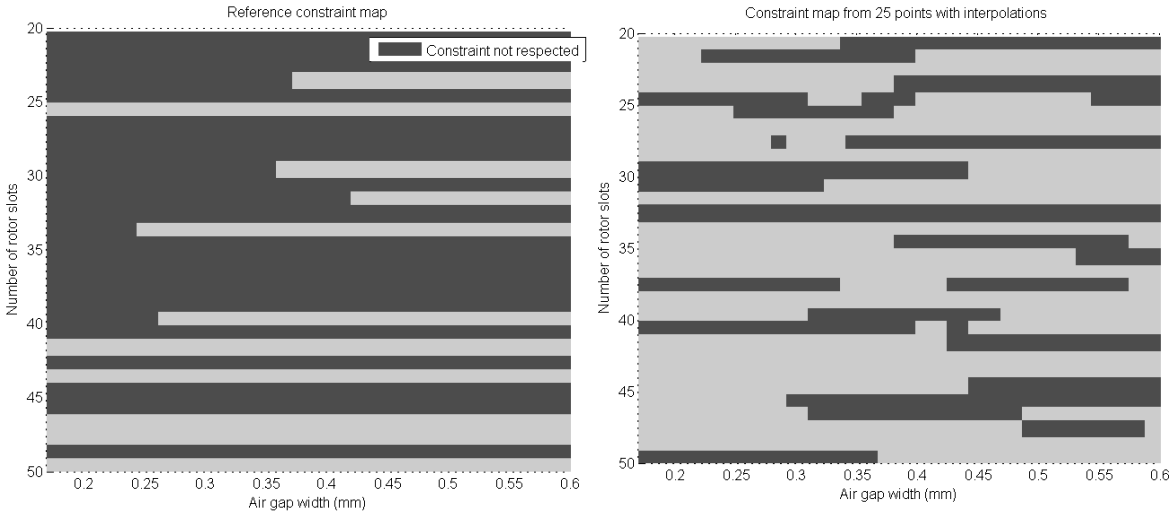


Figure 3.33 : Variations de l'oscillation de couple en fonction des encoches rotor et de l'entrefer

Cette figure confirme la difficulté de modéliser l'oscillation de couple par une surface, car elle est fortement discontinue. On peut remarquer que le pire cas est celui où Qr est égal au nombre d'encoches stator Qs. Même si cette configuration est connue comme étant absurde, elle montre bien l'interaction entre les grandeurs de la topologie des machines. En fixant une limite pour l'oscillation de couple, on obtient la Figure 3.34 (a) du respect de la contrainte en fonction de Qr et ε. Si l'on essaye de reproduire cette cartographie par une interpolation sur un plan d'expérience de 25 points donné par une méthode de carré latin, l'erreur commise est très importante : 56 % d'erreur par rapport à la cartographie de référence (Figure 3.34 (b)).



a) Cartographie de référence b) Interpolation avec 25 points

Figure 3.34 : Cartographies du respect de la contrainte d'oscillation de couple

3.6.2 Méthode avec de l'apprentissage automatique

Une solution est proposée avec les algorithmes d'apprentissage automatique [ARCG14]. Comme pour une surface de réponse, il s'agit de pouvoir estimer le comportement d'un modèle à partir d'un échantillon réduit de données. La différence principale est qu'en plus d'utiliser les points adjacents pour la prédiction, l'algorithme peut exploiter des relations complexes entre les paramètres par des méthodes de classement. Parmi les méthodes de classement existantes, celle des forêts aléatoires [GEGS07] a été retenue pour cette étude. Plutôt que de prédire une valeur d'oscillation de couple, la méthode cherchera à savoir si la contrainte est respectée en classant les points en deux catégories : contrainte respectée ou non. Pour chaque nouvelle géométrie testée, une probabilité de respecter la contrainte sera calculée à partir de l'apprentissage automatique et intégrée dans le modèle analytique. Une fois l'optimisation analytique terminée, la géométrie obtenue sera simulée par éléments finis et si la contrainte n'est pas respectée, car la fonction de probabilité n'était pas précise en ce point, ce dernier sera rajouté à la base des points utilisée par l'algorithme pour déterminer une nouvelle fonction de probabilité plus précise. Une passerelle entre le modèle analytique sous MATLAB® et le modèle éléments fini sous Maxwell® a été développée pour automatiser le processus [ARNO13]. La Figure 3.35 résume le déroulement des étapes pour intégrer l'apprentissage automatique.

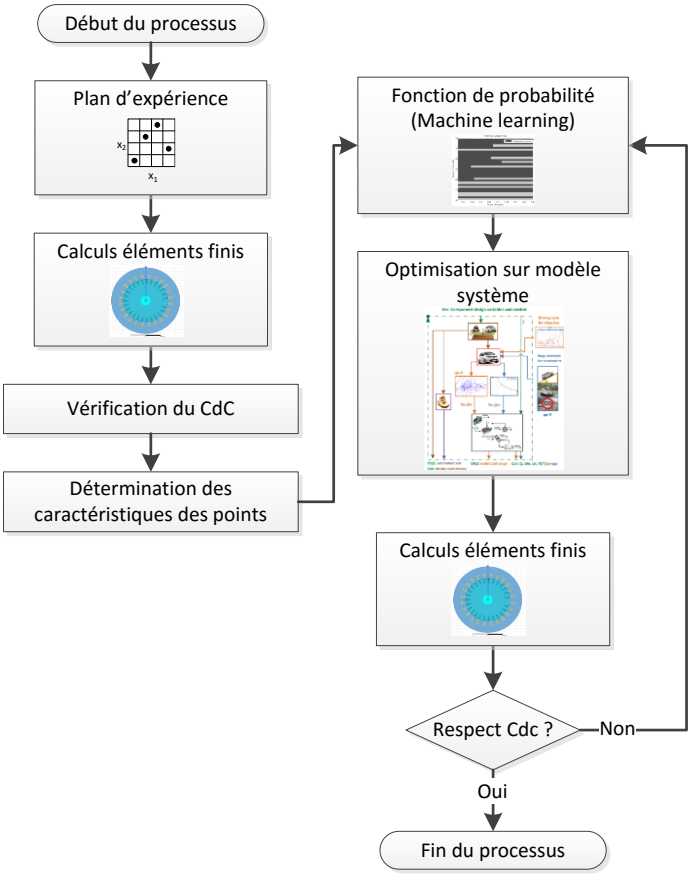


Figure 3.35 : Déroulement du processus d'intégration d'une contrainte par apprentissage automatique

L'algorithme des forêts aléatoires est basé sur la construction de plusieurs arbres de décisions. L'idée générale est de subdiviser les données initiales en sous-groupes à partir de critères prédéfinis

et d'établir la probabilité de respecter la contrainte pour chaque sous-groupe. Cette probabilité est calculée par le rapport entre le nombre de points qui respectent la contrainte sur le nombre de points total du sous-groupe. La notion d'entropie H en tant que mesure du désordre d'un échantillon est utilisée pour obtenir les meilleurs regroupements des données : si H = 0, l'ordre est maximum (tous les points du sous-groupe respectent ou ne respectent pas la contrainte) ; si H = 0.5, le désordre est maximum (la moitié des points respectent la contrainte). Le découpage en sous-groupes, aussi appelé populations, permet d'obtenir un arbre de décision tel que la Figure 3.36.

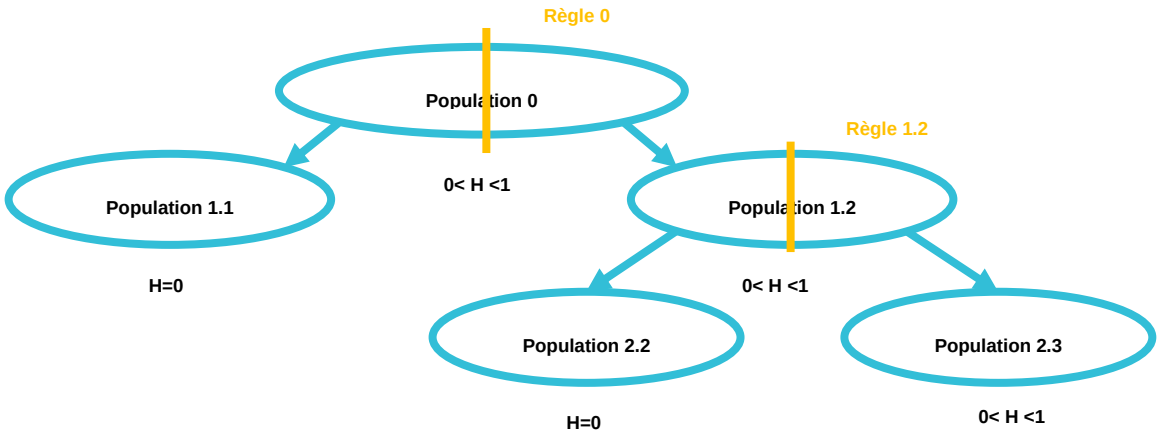


Figure 3.36 : Principe d'un arbre de décision

La méthode des forets aléatoires va générer plusieurs arbres de décision puis pondérer les différentes probabilités obtenues. À partir des calculs d'entropie, l'algorithme déterminera automatiquement dans quelle règle appliquer à quelle sous population. L'originalité réside dans le choix des règles qui permettront d'obtenir une bonne classification. En plus d'utiliser des règles simples de découpage de l'espace, l'algorithme pourra exploiter des règles que nous appellerons « règles expertes » qui vont intégrer les règles de conception des machines électriques. Il s'agit pour notre problème d'étudier par exemple la parité entre Qr et Qs, ou alors encore de calculer le plus grand commun diviseur (PGCD) entre Qr et Qs.

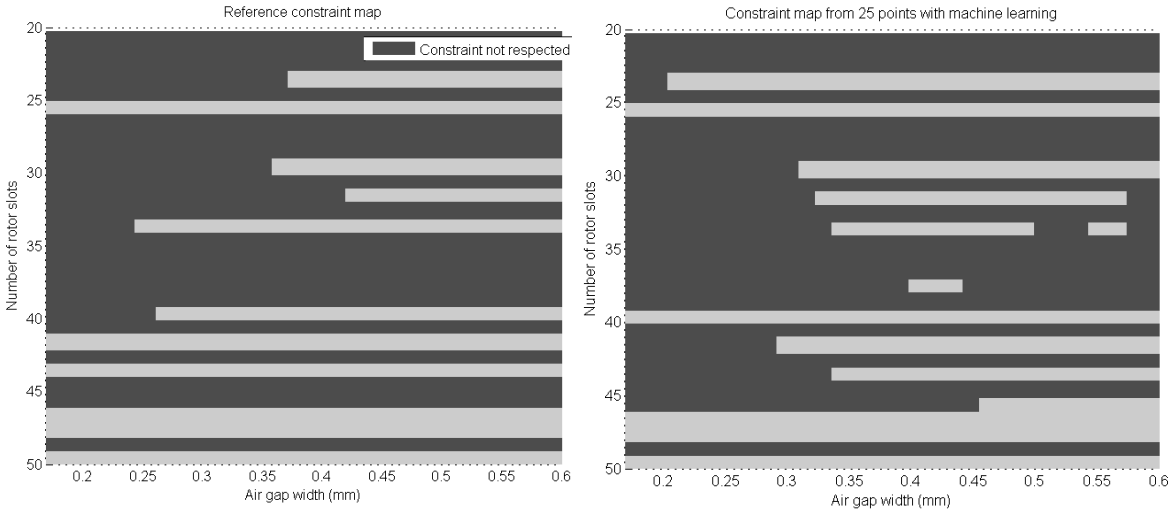
Pour notre cas d'étude, les règles suivantes ont été intégrées :

Tableau 3.5 : Règles pour le classement des points

Catégorie	Règle	Variable
Expert	*Qr* est-il divisible par 2,3,4,5,6,7 ?	*Qr*
	Quel est le PGCD entre *Qr* et *Qs* ?	*Qr*
Divisions de l'espace	Chaque valeur de *Qr*	*Qr*
	Diviser l'espace *Qr* < Constante	*Qr*
	Diviser l'espace ε < Constante	ε

Lorsqu'un nouveau point est testé avec les arbres, si celui-ci arrive dans un sous-groupe avec une probabilité de respecter la contrainte supérieure à 50 %, il sera considéré comme respectant cette contrainte. La Figure 3.37 (b) représente le respect de la contrainte d'oscillation de couple obtenu avec l'apprentissage automatique sur le même échantillon de 25 points utilisés à la Figure 3.34 (b).

Comparée à la référence (Figure 3.37 (a)), l'erreur commise sur le respect ou non de la contrainte est de seulement 8 %. Par contre nous n'obtenons pas avec cette méthode une estimation de la valeur de cette contrainte.



a) Cartographie de référence

b) Apprentissage automatique avec 25 points

Figure 3.37 : Cartographies du respect de la contrainte d'oscillation de couple

Le processus d'optimisation de la Figure 3.35 a été lancé avec cette cartographie de départ. La convergence est obtenue en 3 itérations : les deux premières géométries optimisées ne respectent pas la contrainte et les points sont rajoutés à l'échantillon de l'apprentissage automatique. La méthode s'avère donc très efficace, mais reste couteuse en temps de calcul pour simuler le plan d'expériences initial. Afin de limiter la taille de ce plan, il apparait pertinent de sélectionner un nombre de variables restreint avec les plus influentes sur les critères étudiés.

3.7 Correction du modèle analytique par Space Mapping

Une fois l'optimisation sur le modèle analytique système réalisé, il est indispensable de venir vérifier les résultats obtenus sur des modèles plus précis. Cela peut se faire par exemple :

- Au niveau système, par une simulation du cycle complet non simplifié pour mieux estimer l'autonomie du véhicule ;
- Au niveau machine électrique, par une simulation éléments finis pour vérifier les grandeurs principales comme le couple ;
- Au niveau thermique machine, par des simulations en thermique transitoire pour vérifier que le cahier des charges est bien respecté.

Si ces résultats ne sont pas satisfaisants, le concepteur devra modifier le modèle analytique puis relancer l'optimisation. Cette correction du modèle analytique peut être automatisée par une stratégie de space mapping présentée au paragraphe 3.1.3.2. Dans le cas de la simulation éléments finis de la machine électrique, intégrer cette stratégie est d'autant plus pertinent que nous avons déjà choisi de faire appel au modèle éléments finis dans le cadre de l'apprentissage automatique. Le temps de calcul

ne s'en trouvera donc pas rallongé. La Figure 3.38 représente l'intégration du space mapping dans le processus d'optimisation.

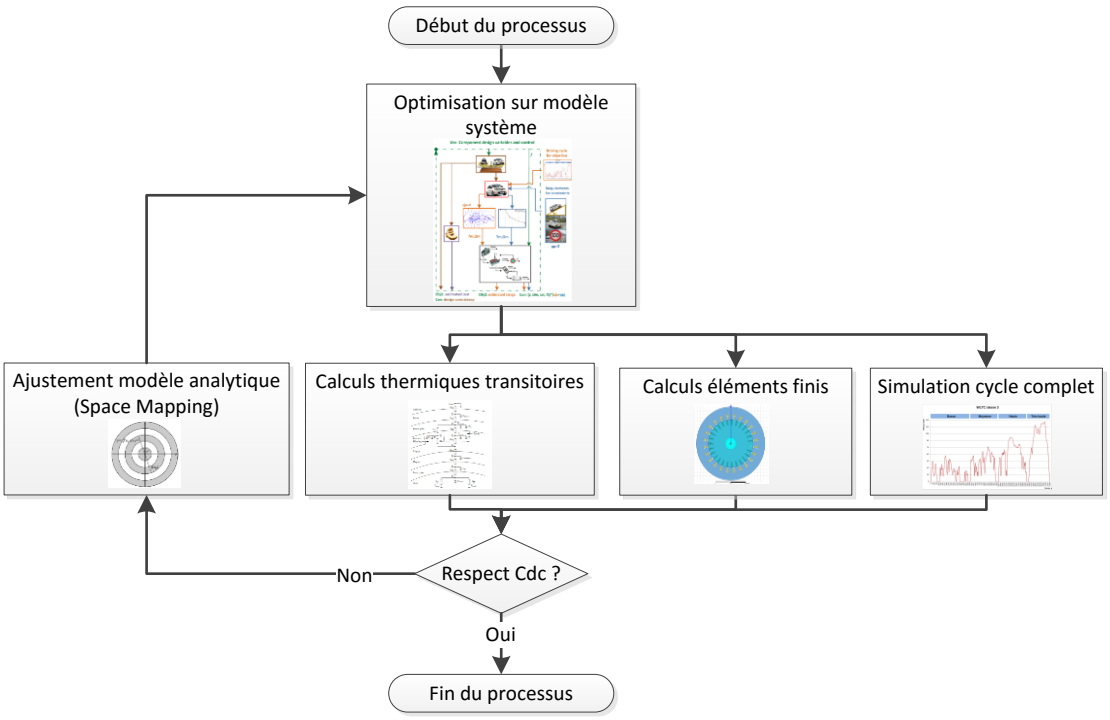


Figure 3.38 : Processus d'ajustement du modèle analytique par *space mapping*

Dans cet exemple, les deux vérifications effectuées sont la thermique transitoire et les résultats éléments finis comme le couple. Pour la thermique, la correction, si elle a lieu, s'effectue sur les limites en température des parties de la machine qui ne respectent pas la contrainte. Pour le couple, la correction s'effectue sur le couple calculé par la résolution du schéma équivalent. Il s'agit donc de la stratégie OSM proportionnelle [BABA01]. Sur le couple, la correction appliquée est la suivante :

$$C_{mot_g\ corrigé} = C_{mot_g} \times \left(\frac{{C_{mot_f}}^k}{{C_{mot_g}}^k} \right) \tag{3.13}$$

Avec
g l'indice correspondant au modèle grossier analytique
f l'indice correspondant au modèle f éléments finis
k l'indice correspondant au résultat de l'optimisation analytique et de la simulation éléments finis à l'itération k

La convergence est obtenue lorsque l'écart entre les modèles grossiers et fins devient acceptable pour le concepteur. En pratique sur notre cas test :

- La correction du couple a nécessité 4 à 6 itérations pour converger ;
- Le calcul thermique transitoire n'a jamais dépassé les limites de températures fixées donc aucun facteur correctif n'a été appliqué ;
- L'ajustement de l'autonomie a convergé dès la 1ère itération.

Au global, 4 à 6 itérations ont donc suffi.

3.8 Architecture proposée

La Figure 3.39 reprend l'architecture de l'optimisation analytique qui intègre

- Le contrôle des points de fonctionnement optimisé pour minimiser les pertes de la chaine de traction, plutôt qu'un contrôle en « V/f » ;
- Le cycle de roulage, discrétisé à la seconde puis simplifié en un petit nombre de points *pc*, entre 4 et 10, avec une pondération par barycentre, plutôt que de réaliser une cartographie de contrôle ;
- Les variables de contrôle intégrées au même niveau que les variables géométriques par une stratégie mononiveau, plutôt qu'une boucle d'optimisation du contrôle imbriquée ;
- La thermique en régime permanent, intégrée à l'optimisation analytique système, et la thermique en transitoire vérifiée après l'optimisation ;
- Les boucles algébriques sur la tension batterie, la température machine et la masse véhicule sont gérées par une stratégie MDF en interne au modèle, plutôt que de gérer ces bouclages par une stratégie IDF au niveau de l'algorithme d'optimisation.

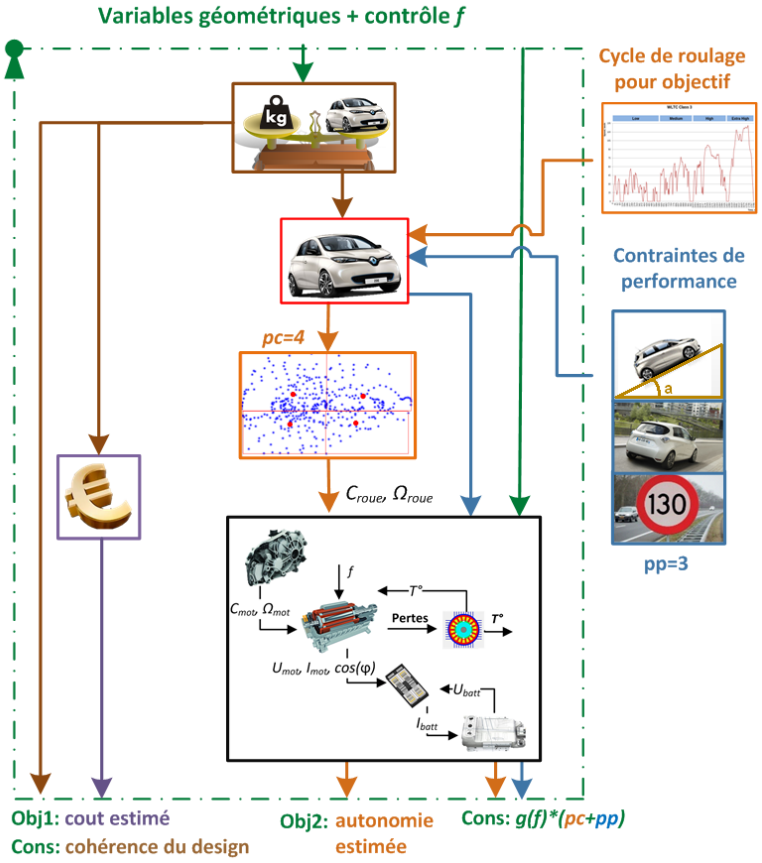


Figure 3.39 : Architecture de l'optimisation analytique système

Le temps moyen du modèle à optimiser, sur MATLAB®, est de seulement 0.006s avec pc=4 et pp=3. La Figure 3.40 reprend l'architecture globale avec l'intégration de modèles plus longs en temps de calcul :

- Une contrainte d'oscillation de couple est ajoutée par apprentissage automatique avec des simulations éléments finis en dehors de l'optimisation ;
- Le modèle analytique est corrigé automatiquement par *space mapping* à partir de ces mêmes simulations éléments finis et de calculs en thermique transitoire.

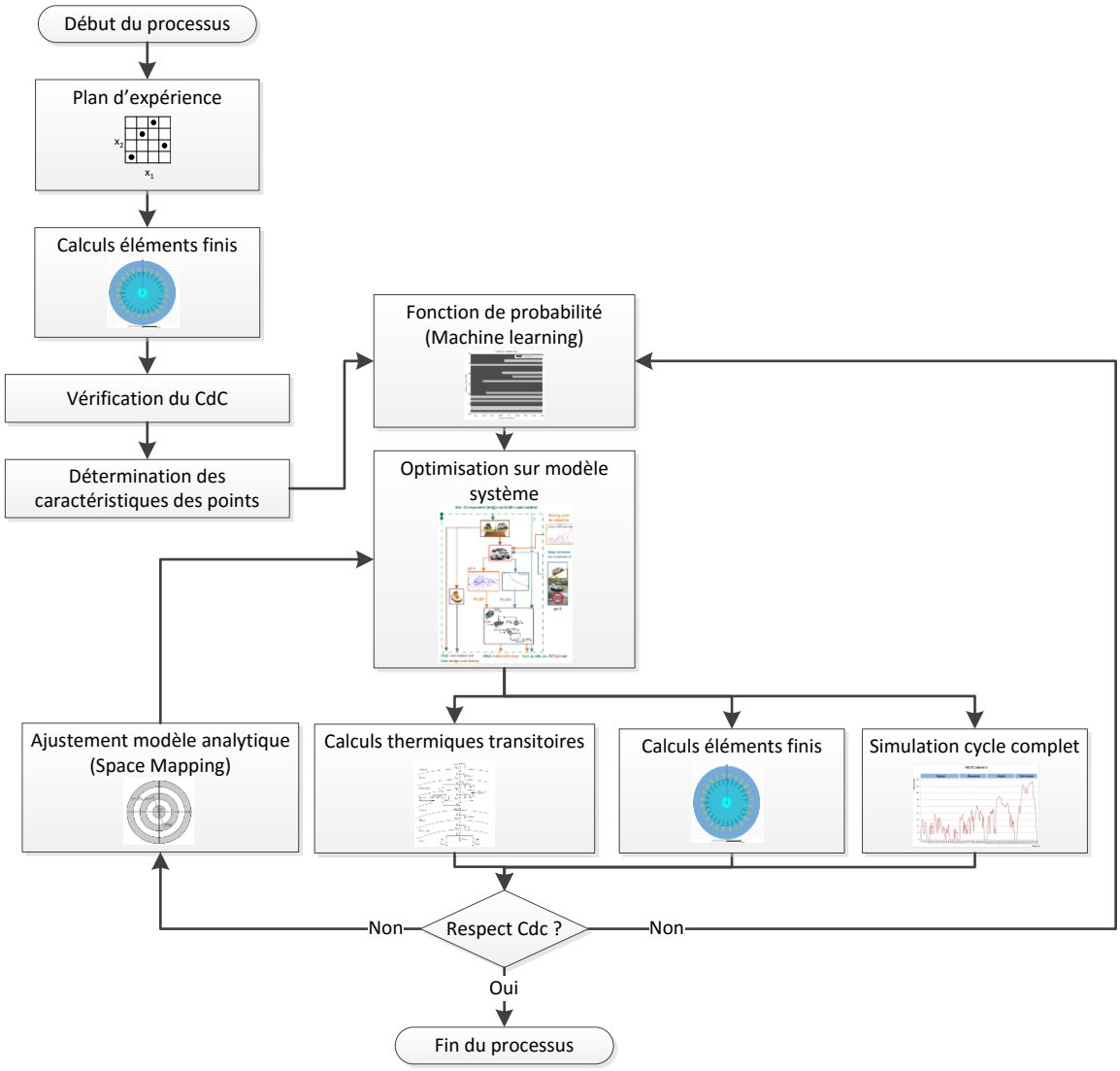


Figure 3.40 : Architecture globale du processus d'optimisation

Les temps moyens sont les suivants :

- 20 min pour la simulation éléments finis d'un point de fonctionnement sur Maxwell® ;
- 20 s pour la simulation du cycle WLTC Moyen complet ;
- 0,1 s pour la simulation d'un point de fonctionnement en thermique transitoire sur 30min.

Le bloc central d'optimisation fait appel au modèle système des milliers de fois, le temps de calcul associé à ce bloc sera étudié au Chapitre 4.

3.9 Bilan

Dans ce chapitre, nous avons d'abord fait un état de l'art des algorithmes, méthodes et stratégies d'optimisation. Notre travail ne porte pas sur les algorithmes, mais sur les stratégies qui vont permettre de jouer avec la structure du problème. Nous avons ainsi détaillé et comparé des stratégies possibles pour gérer la conception par optimisation.

Un premier bilan du temps de calcul a été effectué et montre que la durée d'une optimisation peut très vite dépasser 24h bien que nous utilisons des modèles analytiques. Pour une phase de conception amont, une optimisation rapide est indispensable, car chaque résultat amènera de nouvelles discussions et nécessita d'autres optimisations.

Nous avons établi que le choix du contrôle énergétique de la machine a beaucoup d'impact sur l'estimation de l'autonomie. Sachant que ce contrôle est optimisé sur les véhicules, il est nécessaire de l'optimiser également, en minimisant les pertes, pour notre phase de conception. Ce contrôle optimal est obtenu par une boucle d'optimisation pour chaque point de fonctionnement.

La simulation d'un cycle complet avec le contrôle optimisé en chaque point allonge fortement les temps de calcul. Pour y remédier, deux stratégies ont été comparées : calculer une cartographie de contrôle optimal en amont de la simulation du cycle, ou simplifier le cycle en un nombre de points restreints. Nos résultats montrent que pour un même nombre de points avec contrôle optimisé, la simplification du cycle engendre moins d'erreurs sur l'estimation de l'autonomie.

A partir de ce cycle simplifié, nous avons pu transformer notre problème biniveau, avec des boucles d'optimisation du contrôle imbriquées dans l'optimisation de la géométrie, en un problème mononiveau. Avec cette stratégie, les variables de contrôle sont gérées au même niveau que les variables géométries avec une unique boucle d'optimisation. Nous avons ensuite optimisé une machine avec un cycle simplifié en 4, 23 et 49 points, en bi et mononiveau. Les résultats sont quasi identiques pour toutes les optimisations, alors que la stratégie mononiveau a été 30 à 50 fois plus rapide. Le deuxième résultat de cette étude est qu'une simplification du cycle en 4 points a donné quasiment les mêmes résultats qu'avec 49 points. Une fois les géométries obtenues simulées sur le cycle complet optimisé en chaque point, les écarts sur l'autonomie sont extrêmement faibles : 0.1%.

La gestion de la thermique pour la machine électrique a ensuite été étudiée. Sur notre cas d'étude, l'élément du cahier des charges le plus contraignant thermiquement pour la machine est un point en régime permanent et non transitoire. Nous avons donc choisi de ne simuler que la thermique en régime permanent, bien plus rapide, pendant l'optimisation, et de vérifier le cahier des charges en thermique transitoire sur la géométrie obtenue par l'optimiseur. Par ailleurs la thermique implique une boucle algébrique : les températures doivent être connues pour calculer les pertes qui sont nécessaires pour connaitre les températures. La gestion de ce bouclage a été étudiée en comparant les stratégies MDF et IDF. Nous avons choisi de gérer ce bouclage par une méthode MDF de points fixes vu le faible nombre d'itérations nécessaire. Les autres boucles algébriques de notre problème, sur la batterie, l'onduleur et la masse seront gérées de la même façon.

Certaines contraintes de notre problème ne sont pas calculées par le modèle analytique, par exemple le bruit ou les oscillations de couple de la machine. Pour les intégrer, une stratégie d'apprentissage automatique a été mise en place. Elle consiste à simuler un modèle lourd par éléments finis en dehors de la boucle d'optimisation puis à recréer la contrainte en calculant la probabilité de respecter la contrainte en fonction des caractéristiques des géométries. Cette stratégie d'apprentissage automatique, nouvelle au domaine électromagnétique, a été choisie pour pouvoir gérer efficacement les variables discrètes telles que les nombres d'encoches de la machine, dont l'impact sur les oscillations de couple par exemple ne peut pas être géré par une surface de réponse classique. Une fois le modèle rapide de probabilité mis en place à partir d'un nombre limité de simulations éléments finis, l'optimisation est lancée sur le modèle analytique avec cette nouvelle contrainte. Des itérations entre optimisation analytique et calcul éléments finis se font ensuite jusqu'à ce que la contrainte supplémentaire soit respectée. Cette stratégie s'est avérée performante pour notre problème, en permettant d'intégrer une contrainte d'oscillation de couple avec un nombre limité de simulations éléments finis.

Après une optimisation avec le modèle système analytique, une simulation éléments finis permet de vérifier les résultats. Si des écarts apparaissent entre certaines grandeurs, une correction du modèle analytique est effectuée par stratégie de output space mapping : un coefficient correcteur permet de recaler les sorties du modèle analytique. Sur l'exemple du couple de la machine électrique, la convergence est obtenue en 4 à 6 itérations représentant autant d'appels au modèle éléments finis.

Une fois ces stratégies associées, nous obtenons une architecture d'optimisation qui permet de faciliter la conception en répondant à nos enjeux d'un dimensionnement en amont du cycle en V : optimiser rapidement une chaine de traction d'un point de vue autonomie sur cycle et cout, tout en respectant des performances pour le véhicule ainsi que les contraintes physiques des composants. Le Chapitre 4 s'attachera à étudier l'optimisation analytique pour différents algorithmes et jeux de variables afin de faire ressortir la pertinence d'une optimisation système et de proposer des solutions à notre problème bi-objectif, non linéaire et avec des variables mixtes.

Chapitre 4 Résultats et validations

Le challenge de ce chapitre est d'exploiter l'architecture d'optimisation développée au chapitre précédent pour analyser des résultats d'optimisation avec différentes configurations. Nous chercherons à faire ressortir la pertinence d'une optimisation système plutôt que composant seul ainsi qu'étudier plusieurs possibilités pour l'intégration des variables mixtes.

La première section liste de manière détaillée les variables, contraintes et objectifs qui ont été retenus pour l'étude. Puis une analyse de sensibilité a été menée pour analyser l'influence des variables sur les réponses du modèle système. Les parties suivantes présentent des résultats d'optimisation qui permettent de comparer des jeux de variables différents ainsi que plusieurs algorithmes pour résoudre notre problème complexe. Enfin une **phase de validation** a été menée sur un banc d'essai au laboratoire avec la machine et l'onduleur du Twizy pour valider les hypothèses.

4.1 Cahier des charges, objectifs, variables, contraintes

Avant de détailler les résultats d'optimisation, la liste complète du cahier des charges, des objectifs, des variables et des contraintes du modèle système est établie. Pour chaque composant, le choix des variables considérées pour l'optimisation est expliqué. L'architecture utilisée pour les différents cas tests est celle de la Figure 3.39.

4.1.1 Objectifs

Notre problème est bi-objectif :

- Maximiser l'autonomie sur un cycle de fonctionnement. Le cycle utilisé est WLTC Bas rappelé sur la Figure 4.1. Il sera simplifié en 4 points : $pc = 4$, visibles sur la Figure 4.2 ;
- Minimiser le cout de la chaine de traction.

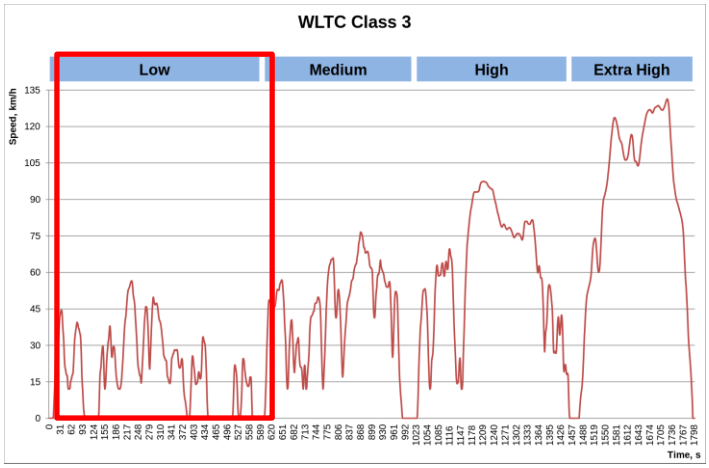


Figure 4.1 : Cycle WLTC de Classe 3 pour les véhicules à passagers

4.1.2 *Cahier des charges performances*

Le cahier des charges énoncé est valable pour l'ensemble des études réalisées. Les valeurs exactes ne sont pas données, mais n'affectent pas les méthodes développées :

- Grimper une pente donnée à vitesse faible avec une accélération faible, pendant 30 s ;
- Réaliser une accélération donnée à vitesse moyenne, pendant 30 s ;
- Maintenir une vitesse maximum donnée en régime permanent
  ➔ On obtient 3 points de fonctionnements performances : $pp = 3$;
- Il n'y a pas de performances spécifiées en mode générateur, car les freins mécaniques peuvent prendre le relai.

Une représentation à la roue est faite sur la Figure 4.2. Les points représentés sur la figure sont valables pour la géométrie initiale et seront recalculés à chaque nouvelle géométrie en fonction de la nouvelle masse du véhicule.

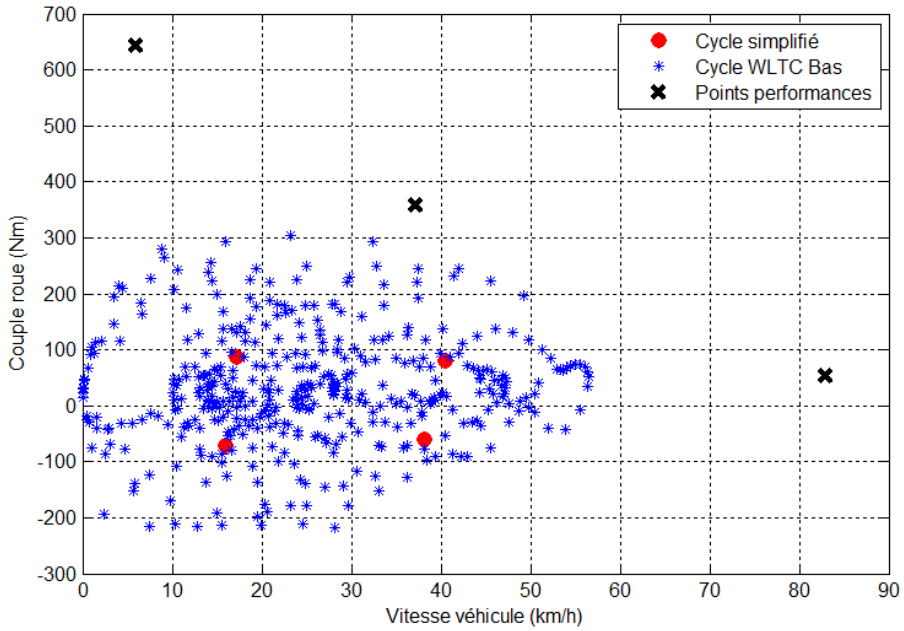


Figure 4.2 : Représentation du cahier des charges à la roue *pc*=4 et *pp*=3

Pour chaque cas les paramètres suivants sont renseignés :

- État de charge batterie SOC ;
- Température extérieure, réducteur, machine, onduleur, batterie. Dans le cas du point en régime permanent, il s'agit d'une température machine et onduleur initiale puisque la température est calculée ;
- Puissance pour les auxiliaires ;
- Limites en densité de courant pour le bobinage stator et la cage du rotor de la machine asynchrone.

4.1.3 Liste des variables considérées

Le Tableau 4.1 liste les variables qui seront considérées pour l'optimisation ainsi que celles qui ont été fixées. Le type des variables peut être discret (d) ou continu (c). Les dimensions sont en millimètre.

Tableau 4.1 : Liste exhaustive des variables du modèle

Composant	Variable	Type	Abréviation	À optimiser?	Valeur	Borne inf.	Borne sup.
Transmission	Nombre de rapports	d	$nb_{rapport}$	Fixé	1	-	-
	Rapport global pour $nb_{rapport} = 1$	c	$k_{AS/BD}$ ou *rapport1*	Oui	9.3	4	15
	Nombre d'étages	d	nb_{etage}	Fixé	2	-	-
	Rapport de l'étage du différentiel		$k_{AP/BD}$	Fixé	4	-	-
Machine	Nombre de pôles	d	*pole*	Oui	4	2	8
	Nombre de phases	d	-	Fixé	3	-	-
	Longueur de fer	c	*S_L*	Oui	120	80	160
	Épaisseur d'entrefer	c	*entrefer*	Oui	0.5	0.3	0.7
	Épaisseur culasse stator	c	*S_h_cul*	Oui	20	10	30
	Hauteur d'encoche stator	c	*S_Hs2*	Oui	13	8	20
	Hauteur de clavette stator	c	*S_Hs1*	Oui	2.7	2	3.5
	Hauteur d'isthme d'encoche stator	c	*S_Hs0*	Oui	0.6	0.4	0.8
	Ratio largeur isthme / largeur encoche stator	c	*S_ratio_Bs0*	Oui	0.45	0.1	0.9
	Ratio largeur dent / pas d'encoche stator	c	*S_ratio_d*	Oui	0.48	0.2	0.8
	Nombre d'encoches par pole et par phase	d	*S_Z_po_ph*	Oui	3	1	5
	Nombre de spires par encoche	d	*Cu_nse1*	Oui	10	5	20
	Coefficient pour le nombre de voies en parallèle dépendant du nombre de poles	d	*Cu_k_Vp*	Oui	4	1	4
	Nombre de fils élémentaires en parallèle par spire	d	*Cu_Fp*	Oui	10	6	20
	Coefficient de remplissage	c	-	Fixé	0.65	-	-
	Couplage triangle ou étoile	d	-	Triangle	-	-	-
	Nombre d'encoches rotor	d	*R_Z*	Oui	48	24	60
	Diamètre de l'arbre	c	*R_Da*	Oui	36	30	40
	Épaisseur culasse rotor	c	*R_h_cul*	Oui	27	15	40
	Hauteur d'encoche rotor	c	*R_Hs2*	Oui	13.5	8	20
	Hauteur de clavette rotor	c	*R_Hs1*	Oui	1.8	1.5	2.1
	Hauteur d'isthme d'encoche rotor	c	*R_Hs0*	Oui	0.7	0.5	0.9
	Ratio largeur isthme / largeur encoche rotor	c	*R_ratio_Bs0*	Oui	0.18	0.1	0.9
	Ratio largeur dent / pas d'encoche rotor	c	*R_ratio_d*	Oui	0.61	0.2	0.8
	Hauteur d'anneaux rotor	c	*R_Hc*	Oui	15	10	20
	Largeur d'anneaux rotor	c	*R_bc*	Oui	15	10	20
	Qualité des tôles	d	-	Fixé	-	-	-
	Épaisseur des tôles	d	-	Fixé	0.5	-	-
	Épaisseur des isolants	c	-	Fixé	0.1	-	-

Composant	Variable	Type	Abréviation	À optimiser?	Valeur	Borne inf.	Borne sup.
Thermique machine	Coefficient de convection	c	-	Fixé	-	-	-
Onduleur	Type de puce (R_{DSON}, Tc_{ON}, Tc_{OFF}, V_{SD})	d	-	Fixé	-	-	-
	Fréquence de commutation	c	f_{com}	Fixé	16kHz	-	-
	Nombre MOSFET en parallèle	d	n_{MOS}	Fixé	-	-	-
	Coefficient tension max machine / tension batterie (surmodulation)	c	-	Fixé	$2\sqrt{2}$	-	-
Thermique onduleur	Résistance thermique du dissipateur	c	R_{THR}	Fixé	-	-	-
Batterie	Type de cellule (masse, cout, capacité, puissance, OCV, DCR)	d	-	Fixé	-	-	-
	Nombre de cellules en série	d	ns	Oui	14	5	30
	Nombre de cellules en parallèle	d	np	Oui	3	1	5

- Variables transmission pour l'optimisation

Pour ce travail, le choix a été fait de ne considérer qu'un réducteur à vitesse unique avec 2 étages de réduction comme celui du Twizy. La seule variable restante est alors le rapport de réduction global du réducteur. Cette variable n'a pas d'influence sur son cout pour notre modèle, il n'y a donc pas de notion de compromis pertes/cout sur ce composant. Cependant le rapport de réduction a un impact sur la vitesse de rotation de la machine et son dimensionnement, il sera donc conservé en variable.

- Variables machine pour l'optimisation

Pour éviter de multiplier les contraintes du modèle, les choix suivants ont été faits pour adapter certaines variables:

- Plutôt que d'avoir les diamètres rotor, stator ou entrefer en variables, les épaisseurs de culasse, d'entrefer et les hauteurs d'encoches seront considérées ;
- Plutôt que d'avoir le nombre d'encoches au stator, le nombre d'encoches par pole et par phase sera considéré ;
- Plutôt d'avoir la largeur des dents ou des isthmes d'encoches, le ratio de la largeur de la dent sur la largeur maximum possible (le pas d'encoche), ainsi que le ratio de la largeur d'isthme sur la largeur de l'encoche, seront considérés ;
- Le nombre de voies en parallèle possibles pour le bobinage étant dépendant du nombre de pôles, un coefficient qui dépend du nombre de pôles sera considéré ;
- Un coefficient de remplissage d'encoche peut être calculé avec les variables de base suivantes: surface d'encoche, nombre de spires, nombre de fils par spire et diamètre du fil, épaisseur d'isolant. Cependant ce coefficient dépend en réalité de nombreux autres facteurs, dont le processus de fabrication. Le choix a donc été fait de partir d'un coefficient de remplissage donné, et de retirer le diamètre de fil des variables de base, qui sera donc calculé.

Les constats suivants permettent de fixer certaines variables :

- Le choix a été fait de fixer les variables de tôle : qualité et épaisseur, qui influent le modèle de pertes fer. Un modèle plus précis de pertes fer qui inclue les harmoniques serait nécessaire pour étudier l'impact de ces variables ;
- Le nombre de phases a été fixé à 3. Exploiter plus de phases relève de critères comme la tolérance aux défauts non considérés ici ;
- Le couplage triangle est préféré, car il permet d'avoir une tension plus importante pour les phases de la machine ;
- En l'absence de modèle de cout pour le refroidissement de la machine, le coefficient de convection a également été fixé puisqu'il ne relève pas d'un compromis : l'optimiseur choisira le coefficient le plus élevé pour minimiser la température de la machine.

➢ Variables onduleur pour l'optimisation

Au niveau de l'onduleur, les hypothèses faites ne permettent pas à l'optimisation de trouver des compromis :

- Avec l'hypothèse des formes d'onde sinusoïdales, la fréquence de commutation des MOSFET de l'onduleur n'impacte pas les pertes de la machine due aux harmoniques. Ce constat est également valable pour le coefficient de tension max machine / tension batterie ;
- Le cout dépend de la puissance et non du type et du nombre de puces MOSFET. Il n'y a donc pas de lien direct entre le cout de l'onduleur et ses variables. Il n'y a également pas de lien entre ces variables et les pertes des autres composants. Elles seront donc fixées ;
- Il n'y a pas non plus de lien entre le cout du système de refroidissement et la résistance thermique du dissipateur.

En l'absence de compromis pertes/cout, laisser libre les variables onduleur dans l'optimisation mènera systématiquement à la configuration qui minimise les pertes :

- Fréquence de commutation minimum qui réduit les pertes onduleur
- Coefficient de tension maximum pour avoir la tension machine disponible la plus élevée ;
- Type de puce avec les meilleures caractéristiques ;
- Nombre de puces en parallèle maximum qui réduit le courant dans chaque branche ;
- Résistance thermique minimum qui abaisse la température et donc les pertes.

Le choix a donc été fait de ne pas intégrer les variables de l'onduleur dans l'optimisation.

➢ Variables batterie pour l'optimisation

La variable du type de cellule a été fixée, car elle relève de nombreux critères comme le vieillissement ou la sécurité non intégrés au modèle.

➢ Bilan sur les variables

Nous avons au final 8 variables discrètes et 18 variables continues possibles, auxquelles viendront s'ajouter 7 variables continues pour le contrôle. Les domaines de variations ont été établis environ plus ou moins 30% pour les longueurs, autour du point initial. Pour les autres variables, chaque cas est spécifique et a été choisi en cohérence avec ce qu'il est possible de faire.

4.1.4 Contraintes prises en compte

Le Tableau 4.2 liste les contraintes intégrées à l'optimisation. Certaines contraintes sont calculées une seule fois (unique) et d'autres sont calculées pour chaque point de fonctionnement (pp+pc).

Tableau 4.2 : Liste des contraintes prises en compte

Composant	Contraintes	Quantité	Abréviation
Machine	Diamètre extérieur stator	unique	-
	Vitesse périphérique du rotor	unique	-
	Densité de courant surfacique bobinage et cage	*pp+pc*	J_{cu}, J_{alu}
	Densité de courant linéique bobinage	*pp+pc*	J_{lin_cu}
	Tension maximum disponible	*pp+pc*	U_{mot}
Thermique machine	Température bobinage et cage	*pp* régime permanent	T_{cu}, T_{alu}
Onduleur	Tension max batterie par rapport à la tension max onduleur	unique	-
	Courant max	*pp+pc*	I_{ond}
Thermique onduleur	Température de jonction	*pp* régime permanent	T_j
Batterie	Courant cellule	*pp+pc*	I_{cell}
	Tension min et max cellule	*pp+pc*	$U_{cell_min}, U_{cell_max}$

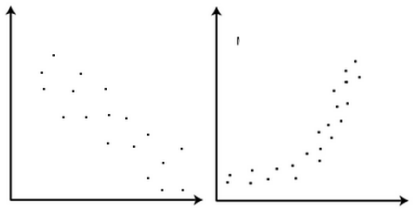
Les contraintes de températures devraient remplacer les contraintes de densité de courant machine ou courant onduleur. Cependant nous avons choisi de ne simuler en thermique que les points du cahier des charges performance que le véhicule doit pouvoir tenir en régime permanent. Les contraintes de densité de courant et de courant restent donc utiles pour les autres points de fonctionnement, comme une montée en pente qu'il faut tenir 30 s.

Au global cela fait 3 contraintes uniques et 8 contraintes pour pp + pc (7 points dans notre cas) et 3 contraintes pour les points pp en régime permanent (1 point dans notre cas) soit en tout 62 contraintes.

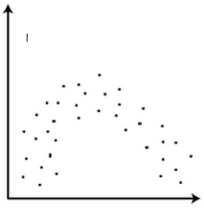
4.2 Analyse de sensibilité

Notre modèle a été confronté à deux outils statistiques d'analyse de sensibilité : la corrélation de Spearman et le Standardized Regression Coefficient (SRC). Les résultats étant similaires, seule la corrélation de Spearman sera décrite ici. Les calculs d'indices SRC sont reportés en Annexe B.

La corrélation de Spearman qui est une mesure statistique de la monotonie d'une fonction. La Figure 4.3 représente schématiquement des variations monotones et non monotones :



a) Relation monotone



b) Relation non monotone

Figure 4.3 : Exemple de relations monotone et non monotone entre deux variables

La première étape du calcul consiste à assigner à chaque variable x un rang parmi les n valeurs du plan d'expérience. La plus grande valeur d'une variable du plan aura son $rang(x_i)$ égal à 1. Puis le coefficient de Spearman ρ_S, entre les variables x et y est calculé par :

$$\rho_S(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\left(rang(x_i) - \overline{rang}(x)\right)\cdot\left(rang(y_i) - \overline{rang}(y)\right)\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(rang(x_i) - \overline{rang}(x)\right)^2 \cdot \sum_{i=1}^{n}\left(rang(x_i) - \overline{rang}(x)\right)^2}} \tag{4.1}$$

Avec $\overline{rang}(x)$ la moyenne des rangs de tous les x. Dans le cas où il n'y a aucun doublon dans le plan d'expérience, le coefficient peut être obtenu directement par :

$$\rho_S(x,y) = 1 - \frac{6\sum_{i=1}^{n}\left(rang(x_i) - rang(y_i)\right)}{n(n^2-1)} \tag{4.2}$$

Les coefficients sont compris entre -1 et 1. Ces valeurs signifient que les variables sont fortement corrélées. Elles sont faiblement corrélées pour des valeurs autour de 0. L'outil MATLAB®, développé dans le cadre de [BERB12] a été utilisé pour avoir une représentation graphique des coefficients de Spearman. Pour cette étude, l'influence d'une sélection de contraintes extraites pour les points de fonctionnement où elles sont les plus critiques a été testée :

- Densité de courant du bobinage stator sur le point à plus fort couple ;
- Courant onduleur sur le point à plus fort couple ;
- Courant batterie sur le point à plus forte puissance ;
- Température du bobinage stator sur le point critique en régime permanent ;
- Tension moteur sur le point à vitesse la plus élevée.

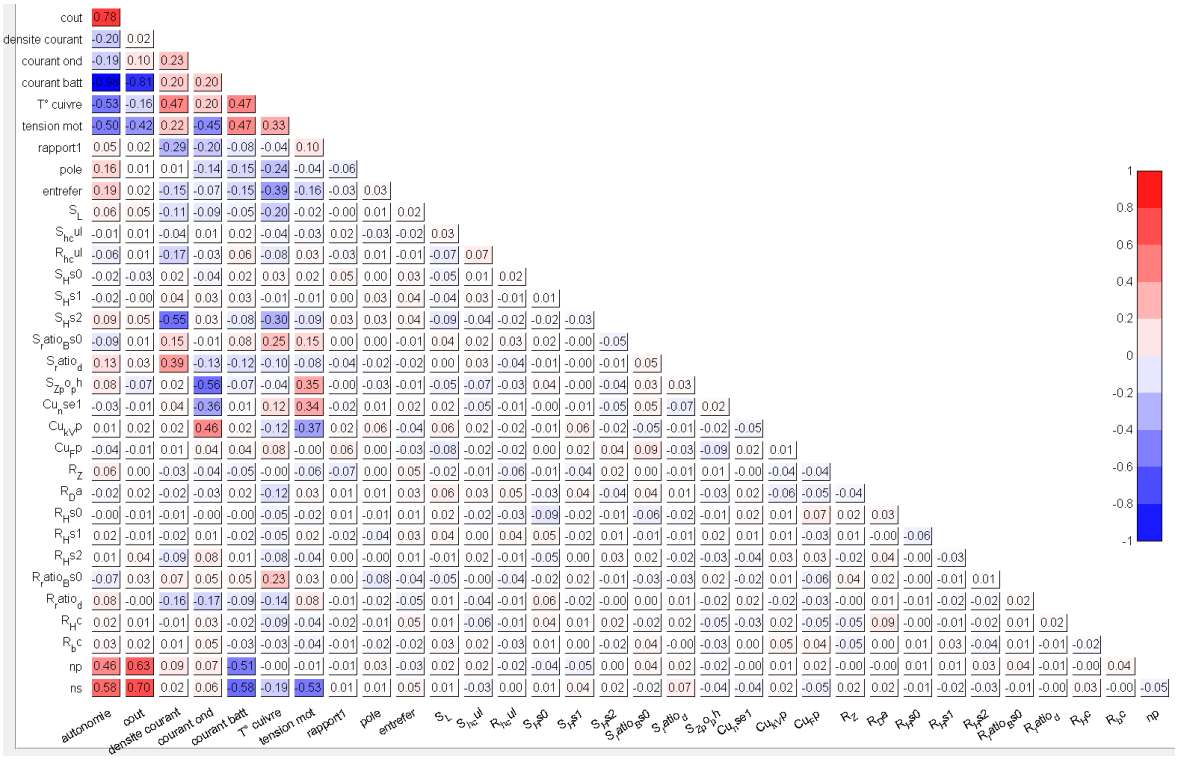


Figure 4.4 : Coefficient de corrélation de Spearman, avec les variables batterie

La Figure 4.4 représente les valeurs des corrélations entre toutes les variables et les sorties du modèle obtenues à partir d'un plan d'expérience en carré latin de 5000 géométries. Les corrélations des variables entre elles sont logiquement faibles. On retrouve la corrélation entre cout et autonomie avec les variables batterie ns et np. On peut également noter la corrélation entre la densité de courant et la surface des encoches stator (S_Hs2 et S_ratio_d) ainsi que les corrélations entre le courant onduleur et le nombre d'encoches stator (S_Z_po_ph), le nombre de spires (Cu_nse1) et le nombre de voies en parallèle (Cu_k_vp). Les coefficients de Spearman ont également été calculés sans les variables batteries et sans les contraintes des points de fonctionnement sur la Figure 4.5.

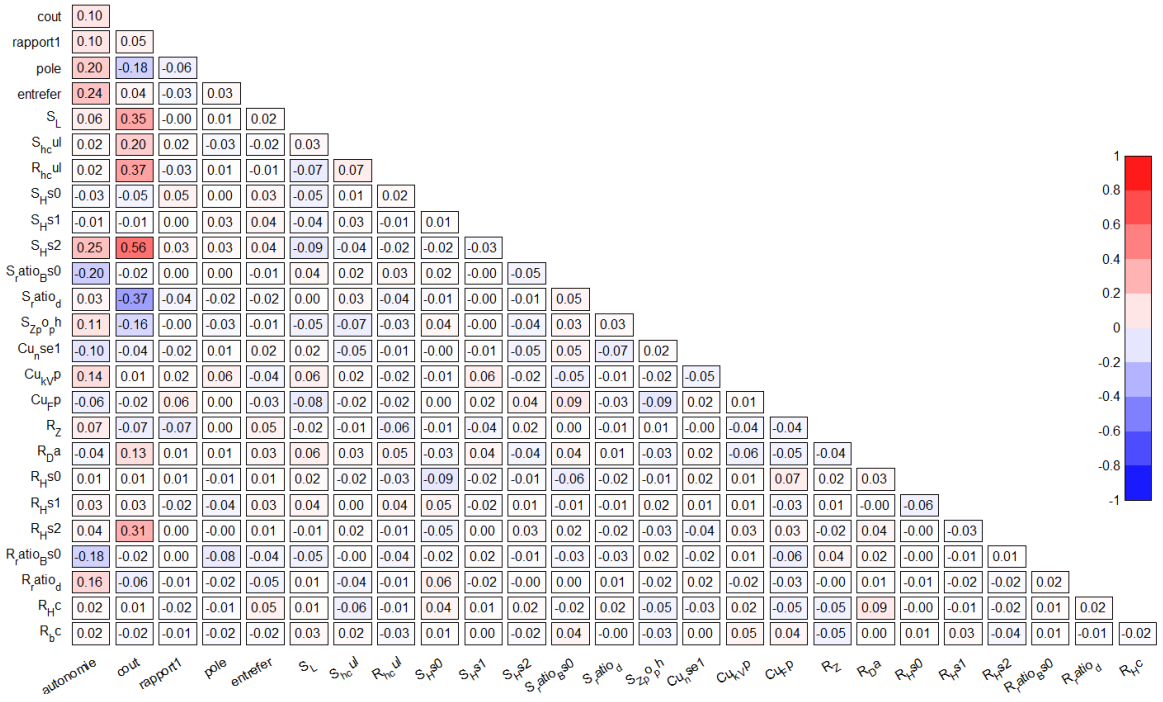


Figure 4.5 : Coefficient de corrélation de Spearman, sans les variables batterie

A partir de ces corrélations, on peut en déduire 6 variables qui semblent avoir peu d'influence et être peu corrélées avec les sorties de notre modèle : les hauteurs d'isthme et de clavette rotor et stator (S_Hs0, S_Hs1, R_Hs0, R_Hs1) qui ne seront pas intégrées à l'étude complète, ainsi que l'épaisseur et la hauteur d'anneaux au rotor (R_Hc, R_bc), qui seront conservées pour l'étude complète pour assurer la cohérence avec la cage.

4.3 Résultats d'optimisation et analyse

Dans cette partie, des optimisations avec différents jeux de variables et d'algorithmes permettront de faire ressortir l'importance de l'optimisation système et d'analyser les résultats obtenus.

Les résultats qui suivent ont été obtenus sur MATLAB® R2011a avec un ordinateur portable équipé d'un Intel® Core™ i7-2760QM @2.40GHz, 4 cœurs, 8 processeurs logiques (hyper-threading) et 8Go de RAM. Nous nous autorisons l'utilisation de 6 processeurs logiques en parallèle avec la commande « matlabpool 6 » de la parallel computing toolbox de MATLAB®.

4.3.1 Importance de l'optimisation système

Pour bien montrer l'importance de l'optimisation système, différents jeux de variables et objectifs ont été comparés [CGRJ14]. Trois problèmes de conception sont formulés :

Tableau 4.3 : Problèmes de conception comparés O1 à O3

Nom	Description	Type
O1	Optimisation de la machine Objectif : minimisation des pertes machine	Optimisation composant
O2	Optimisation de la machine, Objectif : maximisation de l'autonomie	Optimisation composant avec objectif système
O3	Optimisation du système Objectif : maximisation de l'autonomie	Optimisation système

L'objectif est de voir l'impact de la définition du problème sur le résultat. Il est bien entendu évident, mais pas toujours employé, souvent pour des raisons pratiques, que le besoin réel soit défini directement en objectif.

Pour les 3 optimisations, les paramètres sont les suivants :

- L'algorithme utilisé est SQP intégré à Matlab® ;
- Les variables discrètes sont rendues continues ;
- L'objectif de cout est intégré par une méthode epsilon contrainte, et devient donc une contrainte pour chaque optimisation. 20 niveaux de cout sont calculés ;
- 6 points initiaux sont testés pour chaque niveau de cout et sont lancés en parallèle sur un ordinateur multi-processeurs.

Le Tableau 4.4 liste les variables machines choisies pour cette comparaison.

Tableau 4.4 : Variables machine utilisées pour O1, O2 et O3

Composant	Variable	Type	Abréviation	Variabilité
Machine	Longueur de fer	c	*S_L*	Oui
	Epaisseur d'entrefer	c	*entrefer*	Oui
	Epaisseur culasse stator	c	*S_h_cul*	Oui
	Hauteur d'encoche stator	c	*S_Hs2*	Oui
	Ratio largeur isthme / largeur encoche stator	c	*S_ratio_Bs0*	Oui
	Ratio largeur dent / pas d'encoche stator	c	*S_ratio_d*	Oui
	Nombre de spires	d	*Cu_nse1*	Oui
	Epaisseur culasse rotor	c	*R_h_cul*	Oui
	Hauteur d'encoche rotor	c	*R_Hs2*	Oui
	Ratio largeur isthme / largeur encoche rotor	c	*R_ratio_Bs0*	Oui
	Ratio largeur dent / pas d'encoche rotor	c	*R_ratio_d*	Oui
Contrôle	*pp+pc* fréquences	c	*f*	Oui

Pour la configuration O3, les variables système suivantes sont ajoutées (Tableau 4.5) :

Tableau 4.5 : Variables transmission et batterie utilisées pour O3

Composant	Variable	Type	Abréviation	Variabilité
Transmission	Rapport global pour $nb_{rapport} = 1$	c	$k_{AS/BD}$ ou *rapport1*	Oui
Batterie	Nombre de cellules en série	d	*ns*	Oui
	Nombre de cellules en parallèle	d	*np*	Oui

Une optimisation O3 nécessite environ 1500 appels au modèle système de 0.015 s, soit 22 s. Grâce à la parallélisation, l'optimisation sur les 6 points initiaux dure 45 s au lieu de 22 * 6 = 132 s. Enfin, la

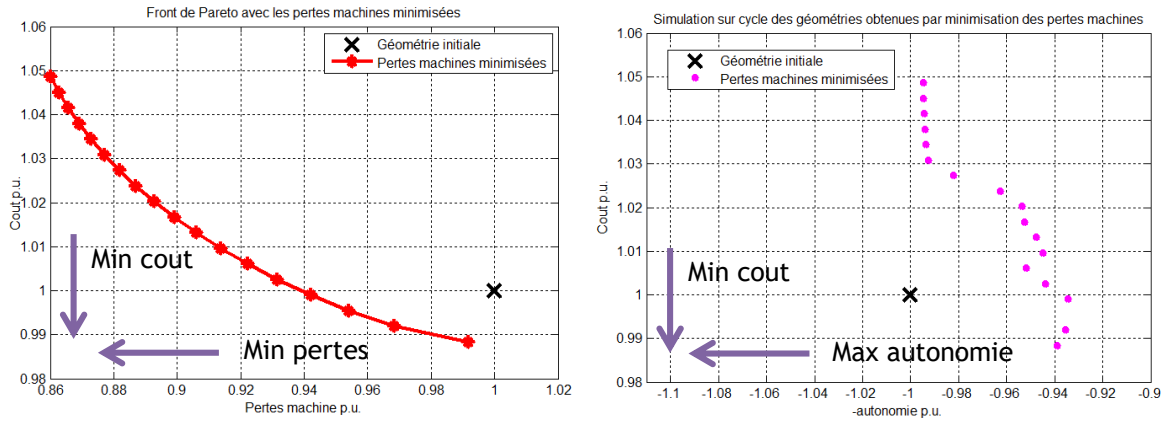
génération d'un front avec 20 niveaux de cout dure environ 15 min (45 s * 20). Le Tableau 4.6 résume les temps de calcul des différentes configurations :

Tableau 4.6 : Paramètres et temps de calcul pour O1 à O3

Configuration	O1	O2	O3
Nombre de variables	11+7		14+7
Points initiaux	6		
Niveaux de cout	20		
Temps de calcul	13 min	13 min	15 min

4.3.1.1 Optimisation composant (O1)

La Figure 4.6 (a) représente le front de Pareto obtenu avec O1 où l'on cherche à minimiser les pertes machines. Les axes sont normés par rapport à la géométrie initiale. Le front présente bien une amélioration de la géométrie initiale en cout et en pertes. La croix représente la solution initiale du Twizy. Cependant, si l'on représente maintenant l'autonomie des géométries obtenues dans le plan autonomie/cout (Figure 4.6 (b)), les résultats sont moins bons que la géométrie initiale ! Ceci s'explique par une augmentation des pertes onduleurs supérieure au gain réalisé sur les pertes machines. Bien que ce cas soit un peu extrême puisque nous n'avons pas modifié l'onduleur pour qu'il soit mieux adapté aux machines optimisées, il démontre le risque d'optimiser un composant sans intégrer le système.



a) Plan pertes machine b) Plan autonomie véhicule

Figure 4.6 : Front de Pareto de la minimisation des pertes machine

4.3.1.2 Optimisation composant avec objectif système (O2)

Ensuite le problème O2 est traité. Il cherche à optimiser la machine en maximisant directement l'autonomie du véhicule. La Figure 4.7 représente le front de Pareto de cette optimisation. Pour cette formulation du problème, le cout et l'autonomie sont effectivement améliorés comparés à la géométrie initiale : le cout diminue de 1.5 % à iso autonomie et l'autonomie augmente de 4 % à iso cout.

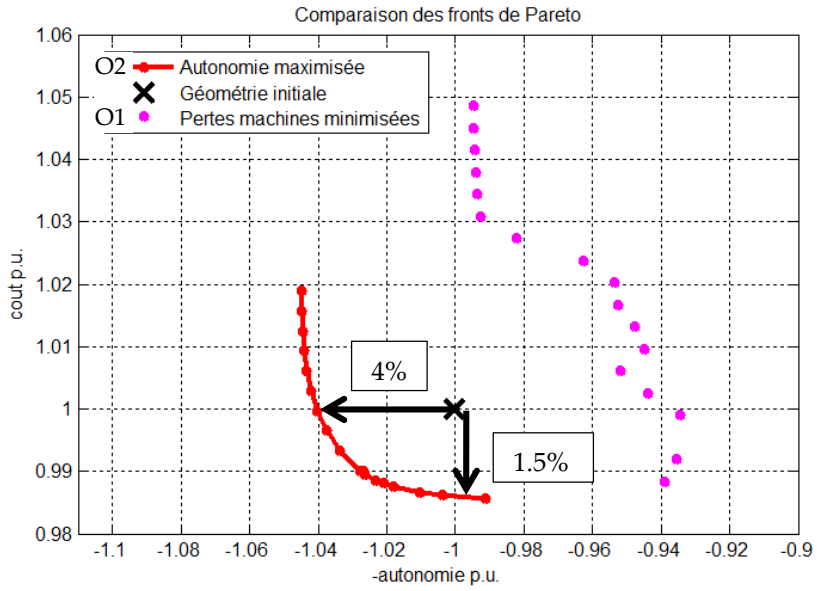


Figure 4.7 : Comparaison des fronts de Pareto de la minimisation des pertes machine et de la maximisation de l'autonomie

4.3.1.3 Optimisation système (O3)

Enfin, le problème d'optimisation système O3 avec des variables système ajoutées au problème O2 est résolu. Afin de différencier l'influence de la batterie et de l'optimisation système, un front a été calculé avec uniquement les variables transmission et batterie O3', en plus du front avec l'ensemble des variables O3. La Figure 4.8 superpose les fronts O1 et O2 obtenus précédemment avec les 2 nouveaux fronts O3 et O3'.

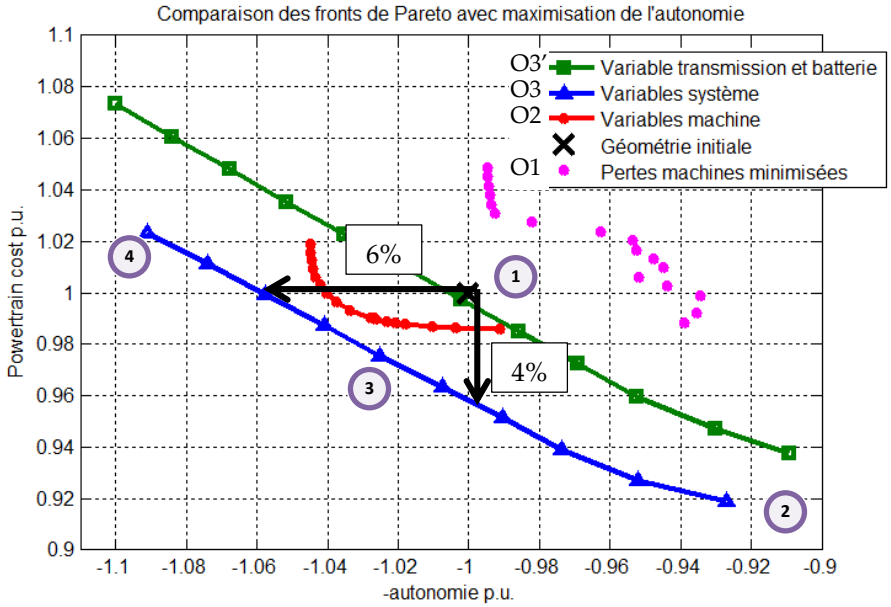


Figure 4.8 : Comparaison de fronts de Pareto avec différents jeux de variables

On observe bien une amélioration des résultats avec les variables systèmes par rapport aux variables machines uniquement. Pour ce cas test, l'autonomie est améliorée de 6 % à iso cout ou le cout est amélioré de 4 % à iso autonomie. Les fronts de Pareto avec les variables systèmes sont bien plus linéaires que le front machine. Cela est dû à la forte influence des variables batterie ns et np qui sont corrélées quasi linéairement avec l'autonomie et le cout. Toutefois, l'utilisation des variables machine permet d'améliorer d'une manière significative le front.

Trois géométries ont été sélectionnées sur le front de Pareto en plus de la géométrie initiale : un intermédiaire et les 2 extrémités du front. Les dimensions des tôles de la machine sont représentées sur la Figure 4.9 pour cette sélection.

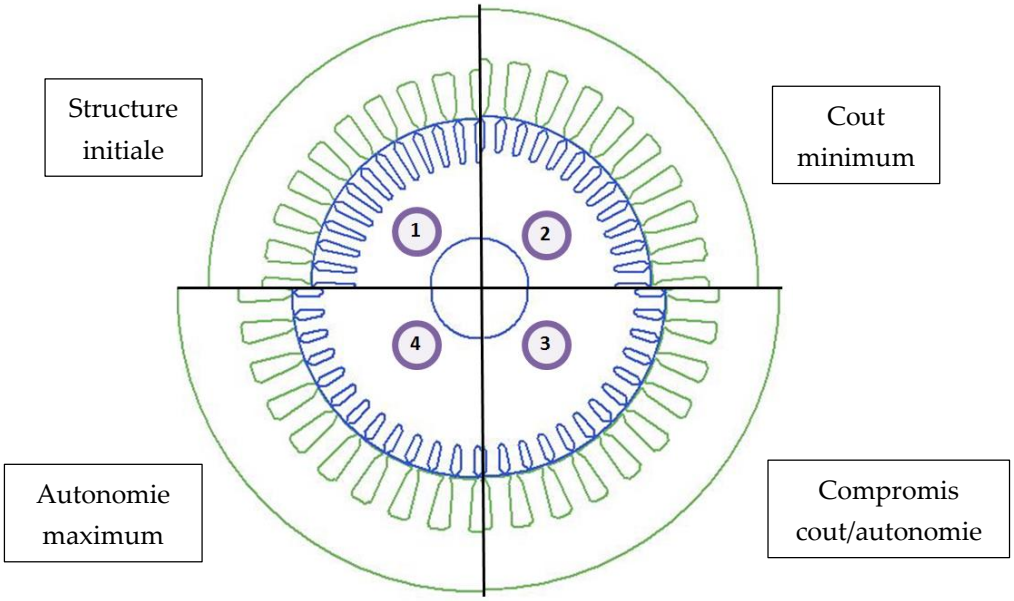


Figure 4.9 : Représentation d'une sélection de géométrie du front de Pareto

On peut observer un grossissement de la machine le long du front de Pareto qui fait diminuer les pertes, mais augmenter le cout. Le résultat pour les variables non visibles sur la Figure 4.9 est représenté sur la Figure 4.10 le long du front de Pareto système. La longueur de fer diminue logiquement avec le cout, et le rapport de réduction augmente pour autoriser des machines avec moins de couple. Le nombre de cellules batterie donne des résultats non entiers puisque ces variables ont été rendues continues. Sans donner de valeurs directement exploitables, cela permet de connaitre les tendances. Le nombre de cellules en série ns est bridé par la limite en tension liée à l'onduleur à base de MOSFET. Le nombre de cellules en parallèle np varie quasi linéairement le long du front : une batterie plus petite coute moins cher et donne moins d'autonomie.

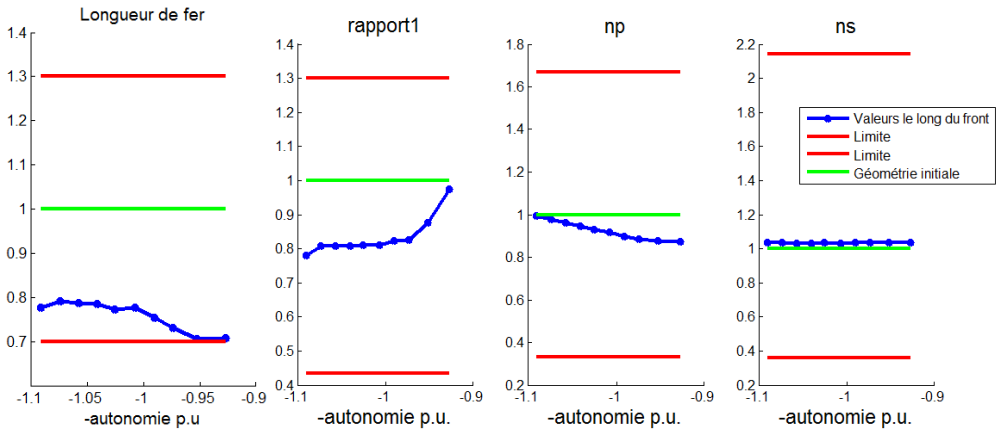


Figure 4.10 : Valeurs des variables le long du front de Pareto système

Enfin la masse de la chaine de traction a été tracée le long du front de Pareto système sur la Figure 4.11.

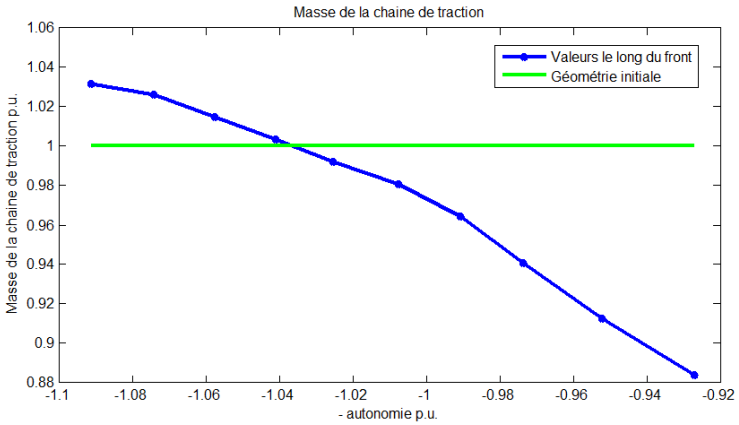


Figure 4.11 : Masse de la chaine de traction le long du front de Pareto système

La courbe suit la tendance de l'alourdissement avec l'autonomie qui augmente, principalement due à l'augmentation de la taille de la batterie.

4.3.1.4 Analyse

Ces résultats sont très intéressants par rapport à notre problématique d'optimisation système. Nous avons vu au paragraphe 3.3.3 qu'en simplifiant un cycle en seulement 4 points, nous commettons une erreur significative sur l'estimation de l'autonomie (10 %), mais la géométrie optimisée est quasiment identique à celle d'une simplification avec 52 points. Ces résultats sont rappelés dans le Tableau 4.7 :

Tableau 4.7 : Rappel des résultats d'optimisation en fonction de la simplification du cycle

	Bi 7	Mono 52
Nombre de points du cycle simplifié	4	49
Erreur sur les pertes du cycle par rapport au cycle non simplifié sur la géométrie initiale (Figure 3.21)	10%	0.2%
Ecart sur l'autonomie des géométries optimisées calculées sur le cycle non simplifié (Résultats 3.3.4)	0.1%	

Dans cette section nous avons obtenu des améliorations bien plus significatives sur nos objectifs, jusqu'à + 6 % d'autonomie, en intégrant le système chaine de traction complet. Pour ces exemples, l'aspect système prévaut sur la précision des modèles. Les résultats obtenus en n'intégrant pas le système seront moins intéressants que ceux obtenus en dégradant la précision des modèles au travers d'une simplification du cycle.

4.3.2 Intégration des variables discrètes

Au travers du cas test précédent, l'optimisation avec l'algorithme SQP donne des résultats satisfaisants : temps de résolution acceptable, qualité des fronts de Pareto et cohérence des géométries obtenues le long du front. Cependant les variables discrètes doivent être rendues continues. Deux solutions pour intégrer ces variables ont été testées : un algortihme Branch&Bound et un algorithme génétique

4.3.2.1 Algorithme Branch & Bound

L'algorithme Branch & Bound utilise ici est celui de l'outil MATLAB® [SOLB00] qui reprend l'algorithme de [EDHL89]. L'idée de cette méthode est de décomposer un problème discret en sous-problèmes continus et d'utiliser le principe de séparations et d'évaluations au moyen d'un arbre avec des nœuds et des branches pour représenter le chemin vers la solution optimisée. Cette technique permet d'éliminer des solutions partielles qui ne mènent pas à la solution optimale. On définit alors les termes suivants :

- Sous-problèmes représentés par les nœuds certaines variables discrètes sont fixées tandis que les autres variables sont considérées continues et libres à déterminer. Un sous-problème à variables continues est résolu par une méthode d'optimisation continue, par exemple la méthode SQP ;
- Solutions partielles faisables ou nœuds actifs : la solution partielle trouvée peut être un optimum global ou local ;
- Solutions partielles non-faisables ou nœuds non-actifs : pas de solution faisable ou non convergence de l'algorithme ;
- Nœud racine : nœud où toutes les variables sont continues, donc à priori, la valeur de la fonction objectif la plus petite connue.

On a ainsi une séparation en nœuds à chaque branche et une évaluation de l'optimum de chaque nœud. Cette méthode étant exacte, elle trouve à coup sûr l'optimum global.

4.3.2.2 Algorithme NSGA2

L'algorithme NSGA2 utilisé ici est celui de l'outil MATLAB® [LIN11] qui reprend l'algorithme de [DPAM02]. L'outil permet d'intégrer des variables mixtes ainsi que des contraintes. L'esprit des méthodes génétiques est basé sur la théorie de l'évolution. Une itération de l'algorithme peut être divisée en 5 étapes :

1) Une population est initialisée aléatoirement (à la première itération) ;
2) Chaque individu de la population est évalué pour avoir les objectifs et contraintes ;
3) Une sélection des meilleurs individus (non dominés) est réalisée en fonction des objectifs ;
4) Un mixage de la population est réalisé soit par mutation soit par croisement entre deux parents :
    - La mutation effectue un changement aléatoire d'un individu, appelé « le parent » pour donner naissance à un nouvel individu, appelé « l'enfant »,
    - Le croisement est une combinaison de deux parents, qui donne lieu à la naissance de deux enfants ;
5) La nouvelle population est créée, statistiquement meilleure que la population mère.

Il n'existe pas de grandeur théorique qui permette de mettre fin à l'algorithme. Le critère d'arrêt est généralement défini par un nombre de générations limite, déterminé empiriquement. La taille de la population initiale et le nombre de générations définiront le nombre d'évaluations du modèle. L'intégration des contraintes est souvent délicate et peut se faire par pondération des fonctions objectifs lorsque les contraintes ne sont pas respectées.

4.3.2.3 Comparaison

Pour comparer les algorithmes, un jeu de variable restreint a été sélectionné avec 5 variables continues et 4 variables discrètes (Tableau 4.8 : Variables utilisées), ainsi que les variables de contrôle.

Tableau 4.8 : Variables utilisées pour comparer les algorithmes

Composant	Variable	Type	Abréviation	Variabilité
Machine	Longueur de fer	c	*S_L*	Oui
	Epaisseur culasse stator	c	*S_h_cul*	Oui
	Hauteur d'encoche stator	c	*S_Hs2*	Oui
	Epaisseur culasse rotor	c	*R_h_cul*	Oui
	Hauteur d'encoche rotor	c	*R_Hs2*	Oui
	Nombre de pôles	d	*pole*	Oui
	Nombre d'encoches par pole et par phase	d	*S_Z_po_ph*	Oui
	Nombre de spires	d	*Cu_nse1*	Oui
	Nombre d'encoches rotor	d	*R_Z*	Oui
Contrôle	*pp+pc* fréquences	c	*f*	Oui

Quatre configurations ont été comparées, présentées dans le Tableau 4.3 :

Tableau 4.9 : Problèmes de conception comparés O4 à O7

Nom	Algorithme	Type des variables
O4	SQP	Variables discrètes relaxées
O5	B&B + SQP	Variables mixtes
O6	NSGA2	Variables discrètes relaxées
O7	NSGA2	Variables mixtes

La gestion du bi-objectif avec la méthode B&B se fait par une méthode epsilon contrainte comme pour SQP seul. Le Tableau 4.10 résume les paramètres et les temps de calcul de ce cas test :

Tableau 4.10 : Paramètres et temps de calcul des configurations O4 à O7

Configuration	O4		O5		O6	O7
Nombre de variables	9+7					
Paramètres	Points initiaux	6	Points initiaux	1	Population	400
	Niveaux de cout	20	Niveaux de cout	20	Générations	200
Temps de calcul	11 min		20 min		8 min	8 min

Les temps de calcul de SQP et NSGA2 sont assez proches. On peut noter que l'intégration des 4 variables discrètes dans B&B a doublé le temps par rapport à SQP seul. Les temps de calcul restent raisonnables pour une optimisation système. La Figure 4.12 représente les 4 fronts de Pareto obtenu avec les problèmes d'optimisation O4 à O7 :

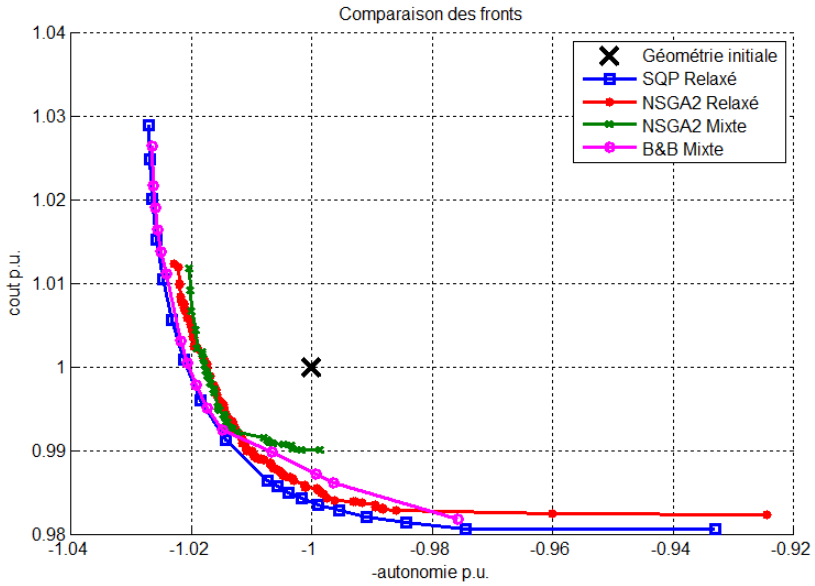


Figure 4.12 : Comparaison des fronts de Pareto avec différents algorithmes

Toutes les optimisations ont permis d'améliorer la géométrie initiale. Le front SQP donne de meilleurs résultats que le front NSGA2 continue. Il faudrait augmenter fortement le nombre de générations pour que le front NSGA2 relaxé se rapproche du front SQP ou utiliser une méthode hybride. De la même façon, le front B&B est meilleur que le front NSGA2 mixte. Les Figure 4.13,

Figure 4.14, Figure 4.15 et Figure 4.16 représentent les valeurs des variables obtenues pour chacun des points le long des fronts de Pareto. Toutes les valeurs sont normées par rapport à la géométrie initiale. La valeur de la pire contrainte est également tracée, sachant que la contrainte est respectée si elle est négative.

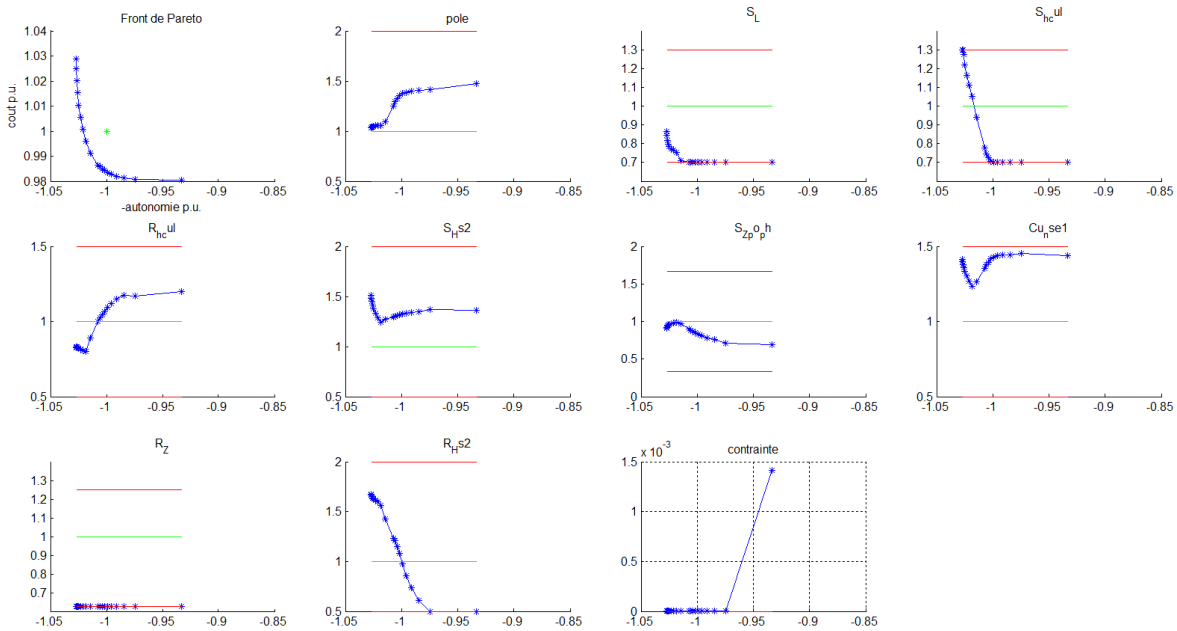


Figure 4.13 : Variables le long du front O4

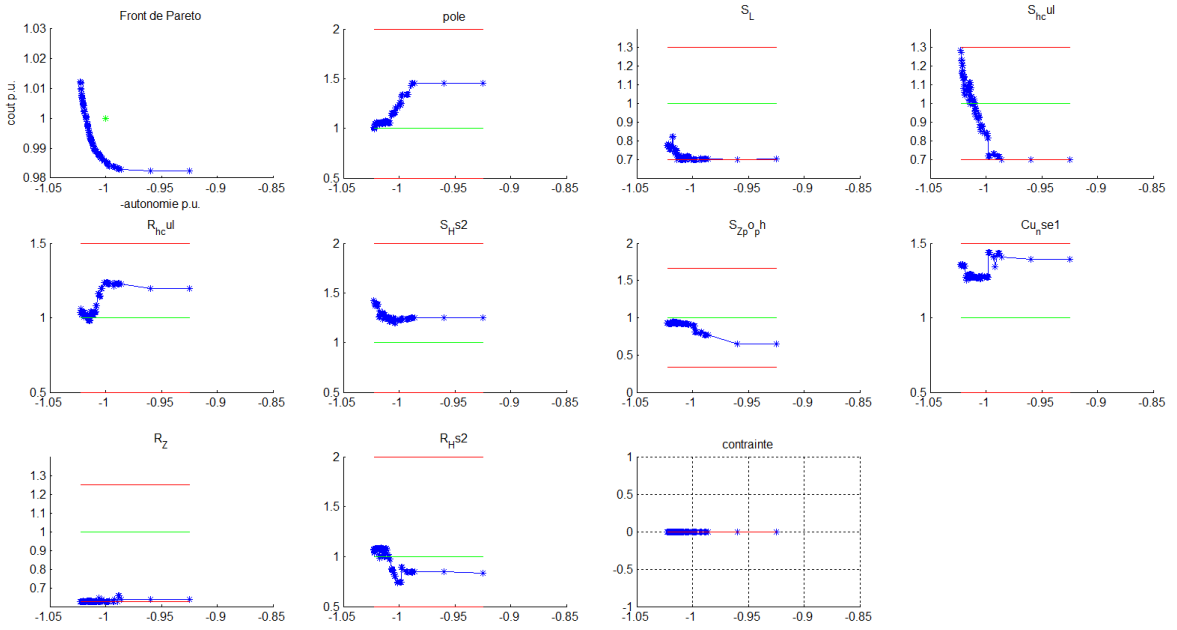


Figure 4.14 : Variables le long du front O5

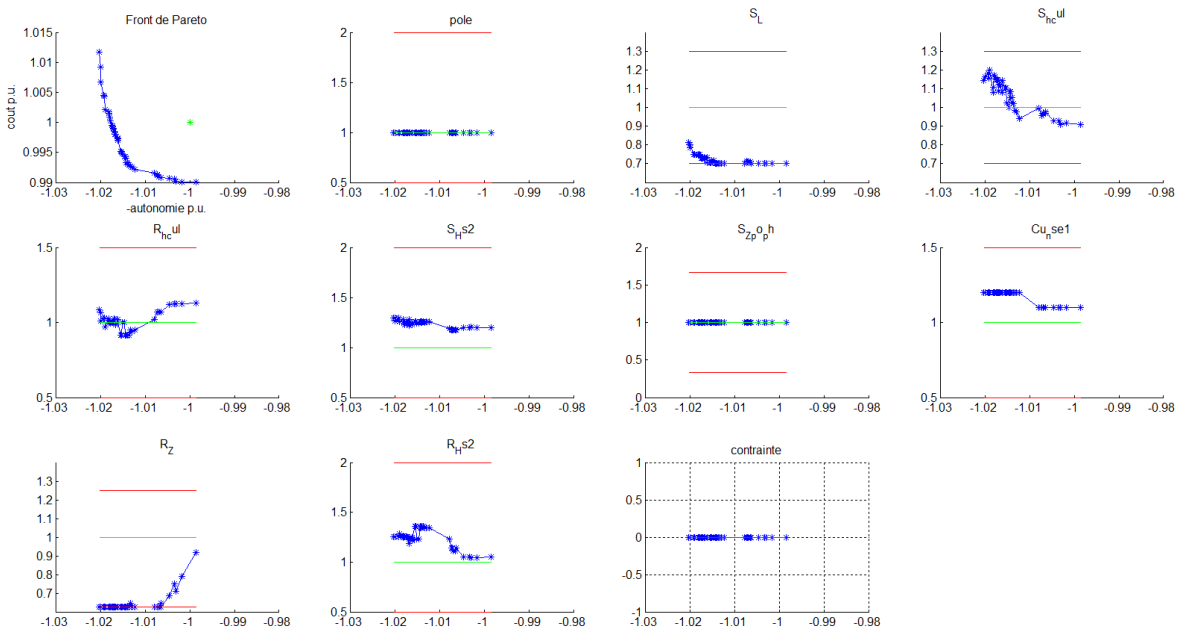


Figure 4.15 : Variables le long du front O6

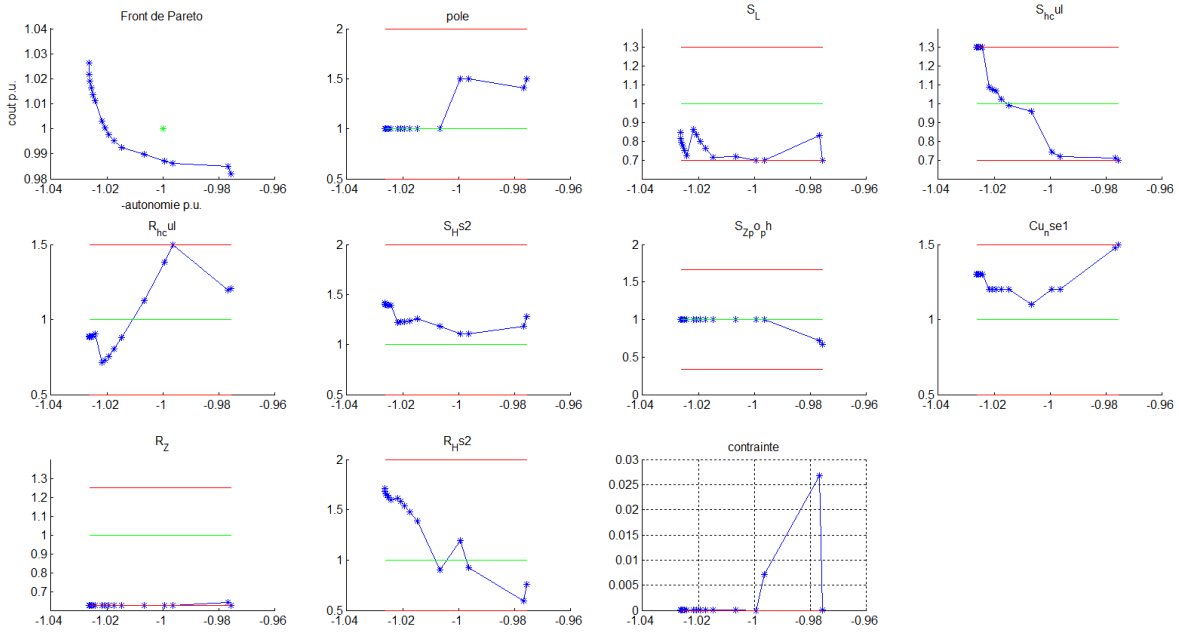


Figure 4.16 : Variables le long du front O7

On peut remarquer que les variations sont globalement cohérentes entre les configurations. Plus spécifiquement les optimisations O4 et O5 avec les variables discrètes relaxées donnent des résultats très proches sur les variables. O6 et O7 présentent plus de différences : nombre de paires de pole pole, nombre de spires Cu_nse1 et hauteur des encoches rotor R_Hs2 en particulier ne sont pas équivalents. Il faudrait augmenter le nombre de générations de NSGA2 sur O6 pour se rapprocher des résultats O7. La gestion des variables mixtes dans NSGA2 justifie donc plus de générations.

Malgré le nombre de contraintes, NSGA2 a bien convergé vers des résultats respectant ces contraintes. L'algorithme a également pu gérer correctement la stratégie mononiveau : si l'on optimise le contrôle (avec SQP) de chaque point de fonctionnement des géométries obtenues par NSGA2, l'autonomie calculée sera identique. Pour autant, sur ce cas test, la méthode B&B s'avère plus efficace que NSGA2. Cependant, avec l'augmentation du nombre de variables discrètes, les temps de calcul de B&B deviennent vite très importants, car la taille des arbres grandit rapidement.

Cette comparaison montre que nous avons désormais à disposition une méthode qui permet de gérer les variables mixtes en un temps de calcul raisonnable. Il faut cependant rester vigilant, car O6 a mal estimé le bas du front ce qui implique d'augmenter la population et les générations.

4.3.3 Étude complète

4.3.3.1 Proposer un ensemble de solutions optimales

Grâce aux résultats encourageants obtenus précédemment, une optimisation a été menée sur le jeu complet des variables systèmes étudiées en intégrant la nature réelle des variables (Tableau 4.11).

Tableau 4.11 : Liste des variables pour l'étude complète

Composant	Variable	Type	Abréviation
Transmission	Rapport global pour $nb_{rapport} = 1$	c	$k_{AS/BD}$ ou *rapport1*
Machine	Nombre de poles	d	*pole*
	Longueur de fer	c	*S_L*
	Epaisseur d'entrefer	c	*entrefer*
	Epaisseur culasse stator	c	*S_h_cul*
	Hauteur d'encoche stator	c	*S_Hs2*
	Ratio largeur isthme / largeur encoche stator	c	*S_ratio_Bs0*
	Ratio largeur dent / pas d'encoche stator	c	*S_ratio_d*
	Nombre d'encoches par pole et par phase	d	*S_Z_po_ph*
	Nombre de spires	d	*Cu_nse1*
	Coefficient pour le nombre de voies en parallèle dépendant du nombre de poles	d	*Cu_k_Vp*
	Nombre de fils élémentaires en parallèle par spire	d	*Cu_Fp*
	Nombre d'encoches rotor	d	*R_Z*
	Diamètre de l'arbre	c	*R_Da*
	Epaisseur culasse rotor	c	*R_h_cul*
	Hauteur d'isthme d'encoche rotor	c	*R_Hs0*
	Ratio largeur isthme / largeur encoche rotor	c	*R_ratio_Bs0*
	Ratio largeur dent / pas d'encoche rotor	c	*R_ratio_d*
	Hauteur d'anneaux rotor	c	*R_Hc*
	Largeur d'anneaux rotor	c	*R_bc*
Contrôle	*pp+pc* fréquences	c	*f*
Batterie	Nombre de cellules en série	d	*ns*
	Nombre de cellules en parallèle	d	*np*

Quatre configurations ont été optimisées (Tableau 4.9) :

Tableau 4.12 : Problèmes de conception comparés O8 à O11

Nom	Algorithme	Type des variables
O8	SQP	Variables discrètes relaxées
O9	B&B + SQP	Variables mixtes
O10	NSGA2	Variables mixtes
O11	SQP post NSGA2	Variables continues uniquement

La configuration O11 consiste à sélectionner certains résultats de la configuration O10, d'en fixer les variables discrètes et d'optimiser les variables continues restantes. 20 résultats de la configuration O10 ont été sélectionnés uniformément le long du front. La Figure 4.17 résume l'enchainement des algorithmes :

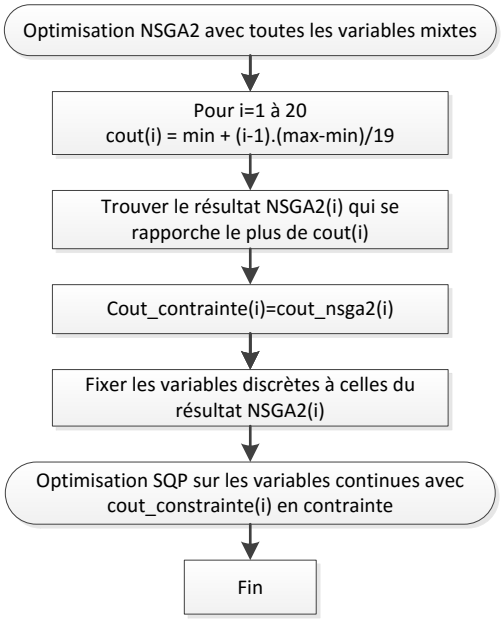


Figure 4.17 : Déroulement des optimisations O10 puis O11

Le Tableau 4.13 donne les temps de calcul pour chacune des configurations :

Tableau 4.13 : Paramètres et temps de calcul des configurations O8 à O11

Configuration	O8		O9		O10		O11	
Nombre de variables	22+7						14+7	
Paramètres	Points initiaux	10	Points initiaux	1	Population	1000	Points initiaux	6
	Niveaux de cout	20	Niveaux de cout	1	Générations	300	Niveaux de cout	20
Temps de calcul	30min		2h		46min		15min	

Comparé à l'étude précédente, le nombre de points initiaux de SQP a été augmenté à 10 pour donner de bons résultats avec plus de variables, cette valeur est obtenue par tâtonnement. Le nombre

d'évaluations du modèle pour chaque point initial est compris entre 3000 et 5000 pour que l'algorithme converge. Il en va de même pour la population et les générations de NSGA2 qui ont été augmentées. La Figure 4.18 représente les fronts de Pareto pour les différents problèmes d'optimalisation.

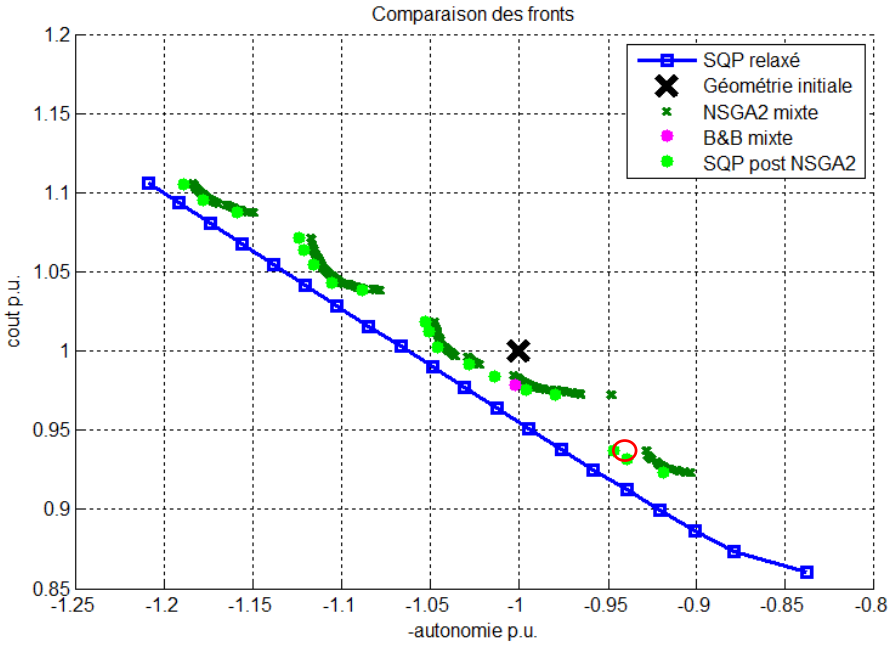


Figure 4.18 : Comparaison des fronts de Pareto

Le front SQP avec les variables discrètes relaxées donne comme prévu les meilleurs résultats et permet de servir de référence. Le front NSGA2 mixte présente la singularité d'être constitué de plusieurs « croissants ». Chaque croissant correspond à une configuration np/ns pour la batterie. Puis l'algorithme SQP a été utilisé pour optimiser les variables continues. Pour chaque point, le cout donné par NSGA2 est imposé en contrainte pour SQP, seule l'autonomie est donc améliorée entre NSGA2 et SQP. On observe bien une amélioration du front NSGA2 après avoir optimisé les variables continues avec SQP. L'unique point optimisé par Branch&Bound se trouve sur ce même front. Pour chaque résultat, les contraintes sont bien toutes respectées. Par exemple pour la géométrie entourée en rouge, les contraintes des points de fonctionnement performance ont été tracées sur la Figure 4.19. Plus la valeur est négative, plus la contrainte est respectée. Pour les points 1 (démarrage en pente) et 2 (accélération max), les contraintes en butée sont la densité de courant surfacique du bobinage et le courant maximum accepté par l'onduleur. Pour le point 2, le courant batterie, qui est une image de la puissance demandée, est également quasiment en butée. Pour le point 3 (vitesse maximum en régime permanent), la contrainte de température du cuivre est quasiment en butée.

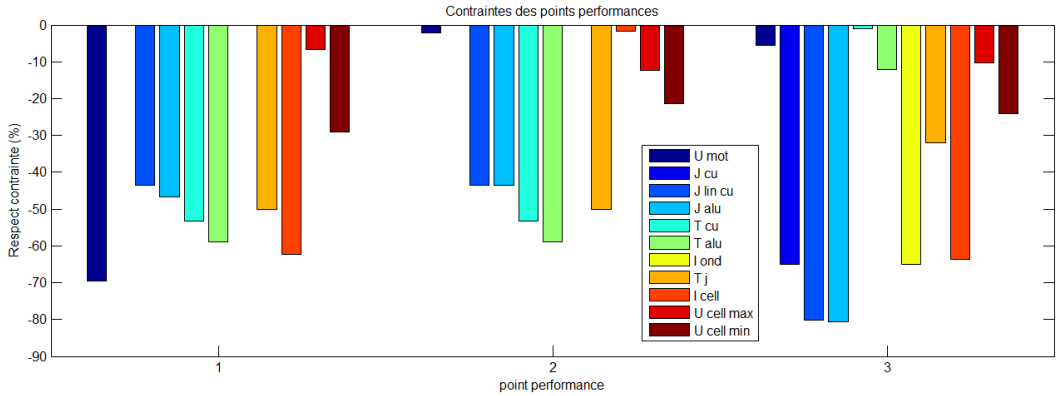


Figure 4.19 : Contraintes des points performances

Les Figure 4.20 et Figure 4.21 représentent les résultats de chaque variable le long des fronts SQP relaxé et NSGA2 mixte. L'évolution des variables est continue le long du front sauf pour les variables de bobinage. En effet plusieurs jeux des variables de bobinage peuvent donner des résultats très similaires sur le cout et l'autonomie. Il faudrait intégrer des critères de cout de fabrication pour mieux discerner les choix.

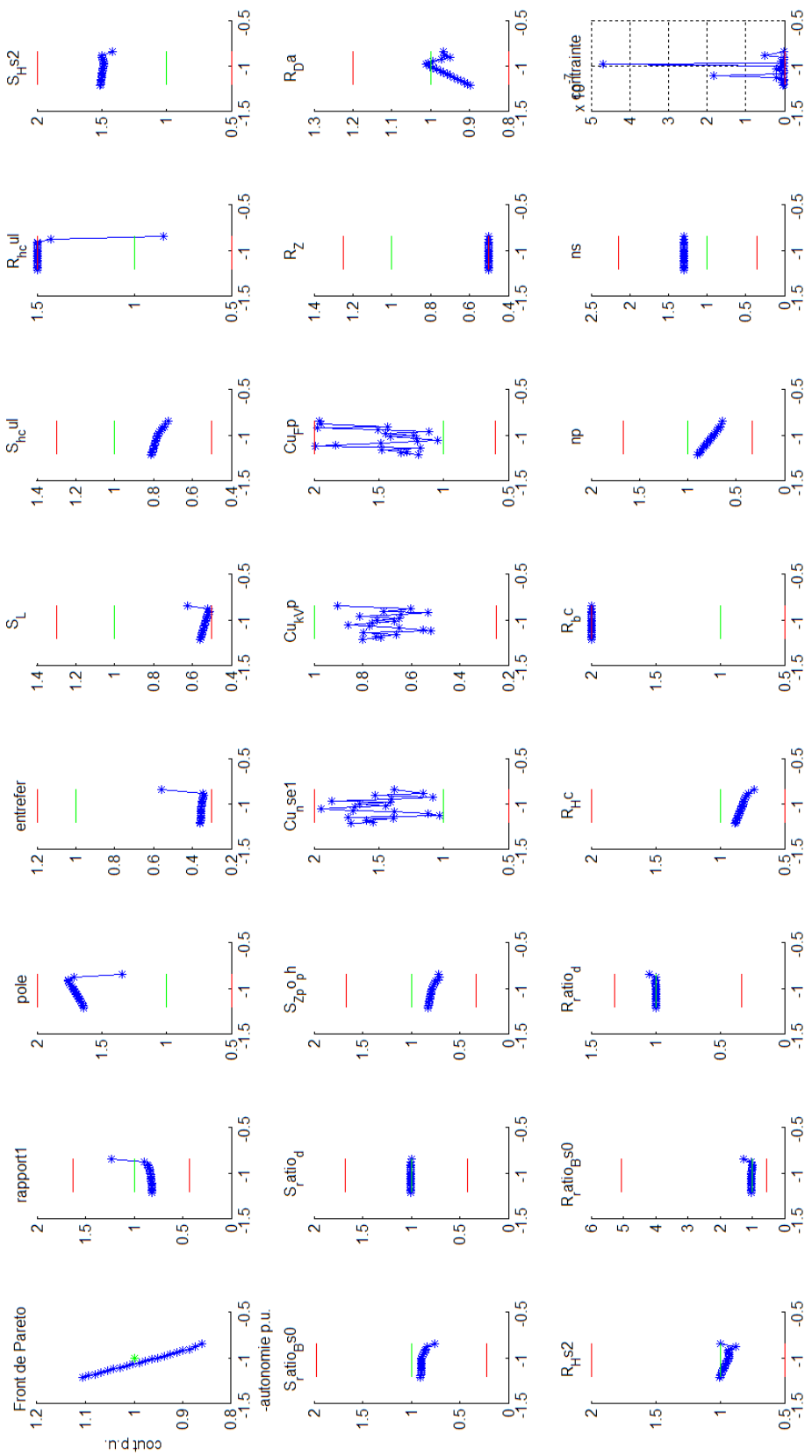


Figure 4.20 : Variables le long du front SQP

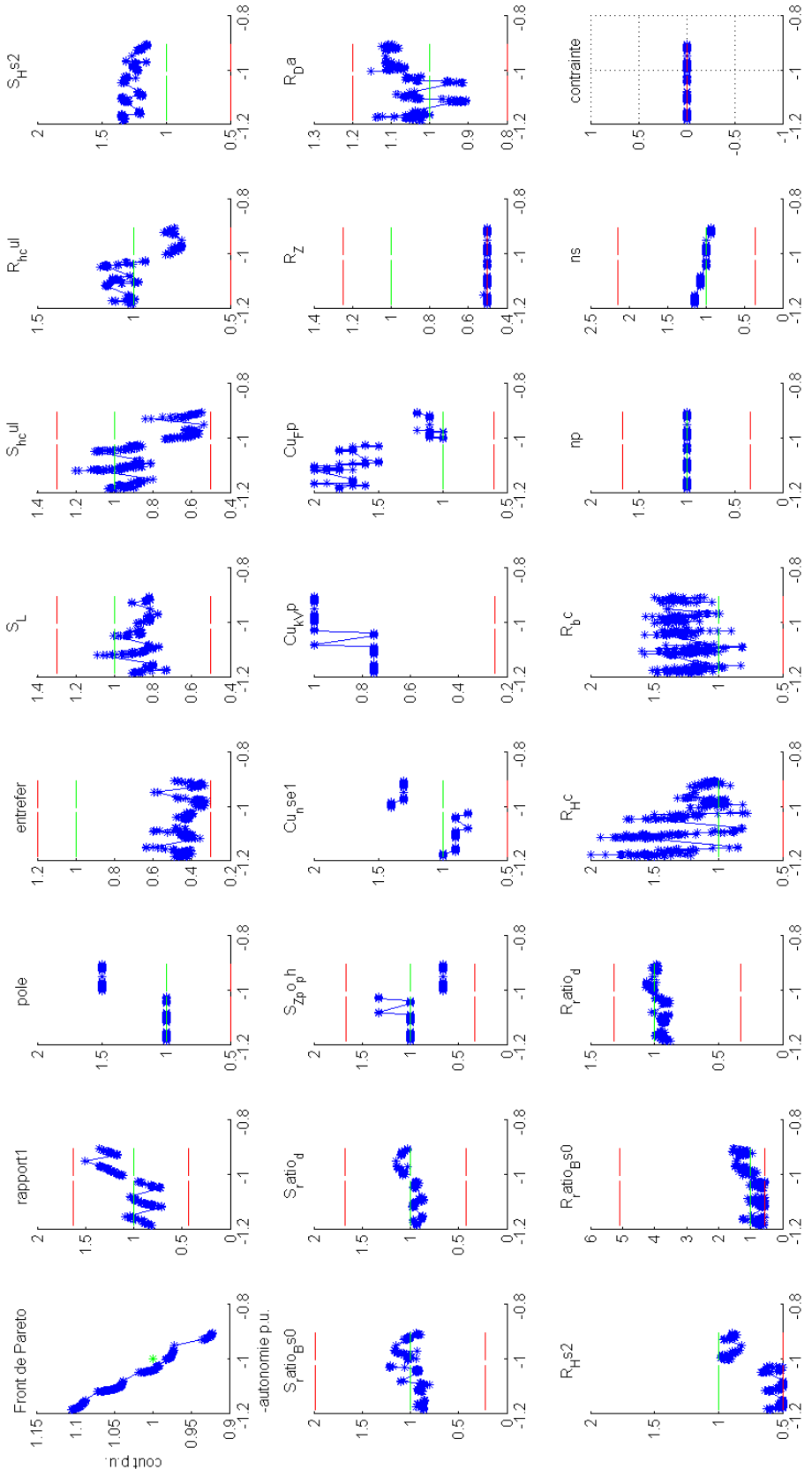


Figure 4.21 : Variables le long du front NSGA2

La variation des géométries le long du front NSGA2 est particulièrement intéressante. Pour chaque croissant, on peut observer un schéma qui se répète sur la plupart des variables continues. Ces résultats sont des pré-dimensionnements qui permettent d'orienter les choix et de chiffrer les gains potentiels au niveau système. Nous obtenons ainsi une base qui permettra des discussions et négociations entre les experts travaillant sur chaque composant. L'étude pourra ensuite être affinée pour la machine électrique en intégrant les stratégies de space mapping et apprentissage automatique décrites au Chapitre 3. Avec l'architecture et les algorithmes d'optimisation sélectionnés, nous avons donc résolu le problème de conception par optimisation d'une chaine de traction électrique en environ 1h de calcul, avec 22 variables mixtes, 40 contraintes non linéaires qui permettent de respecter des performances véhicules, et 2 objectifs : maximiser l'autonomie sur un cycle de roulage et minimiser le prix du système.

4.3.3.2 Robustesse des résultats

Le jeu de résultats que nous avons obtenus avec la configuration O11 a été simulé en changeant des éléments : le cout de la batterie, la température ambiante, et le cycle de roulage.

- Robustesse du cout batterie

La robustesse du cout batterie a été testée en le divisant par 2 (Figure 4.22), y compris pour la géométrie initiale.

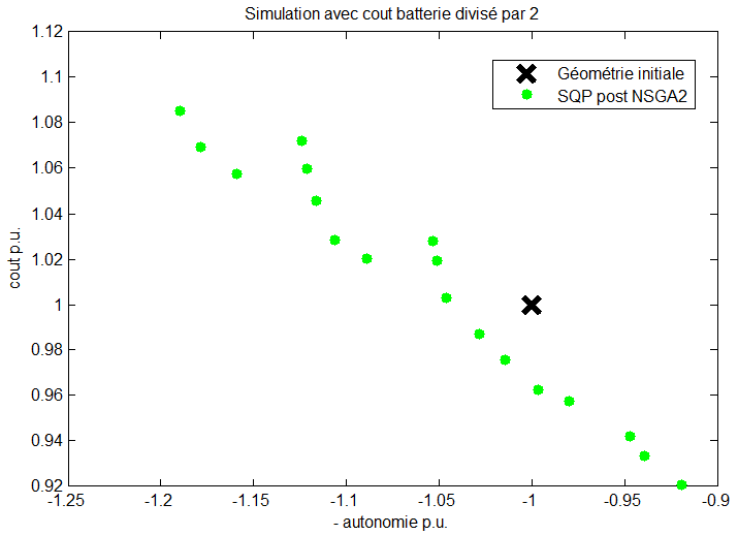


Figure 4.22 : Simulation des résultats précédents avec cout batterie divisé par 2

Le front est fortement impacté, certains points ne sont plus optimaux du point de vue de Pareto. Ce résultat laisse envisager un front qui pourrait être amélioré en réalisant une nouvelle optimisation avec cette hypothèse.

- Robustesse de la température ambiante

Un 2nd test a été fait sur la température ambiante qui est également celle des batteries : en fonction du pays pour lequel le véhicule sera vendu, le dimensionnement peut être différent. La simulation du cycle WLTC « Bas » avec une température batterie de -20 °C donne les points de la

Figure 4.23. Là encore, certains points ne sont pas optimaux et réaliser une optimisation spécifique pour cet usage serait nécessaire.

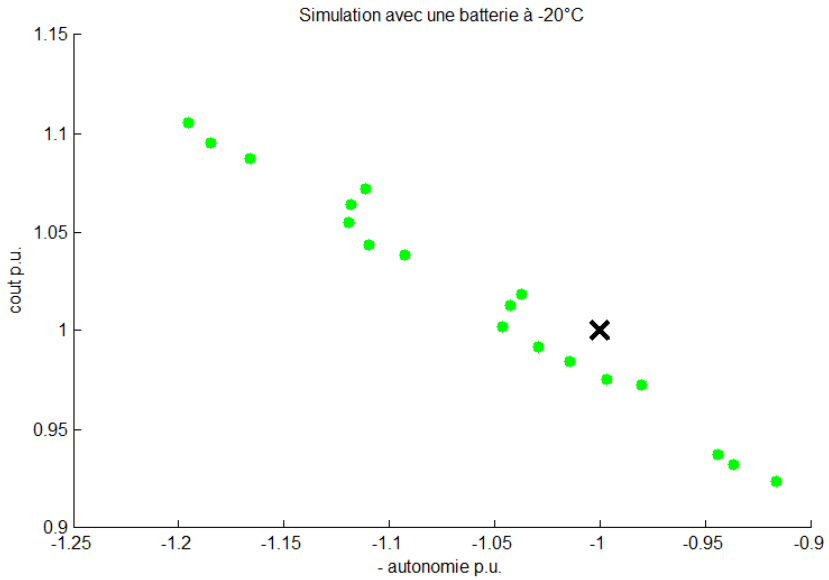


Figure 4.23 : Simulations des résultats précédents avec $T_{batt} = -20\ °C$

- Robustesse au cycle de roulage

La robustesse au cycle de roulage a également été testée en simulant le cycle WLTC « Moyen » sur ces mêmes géométries :

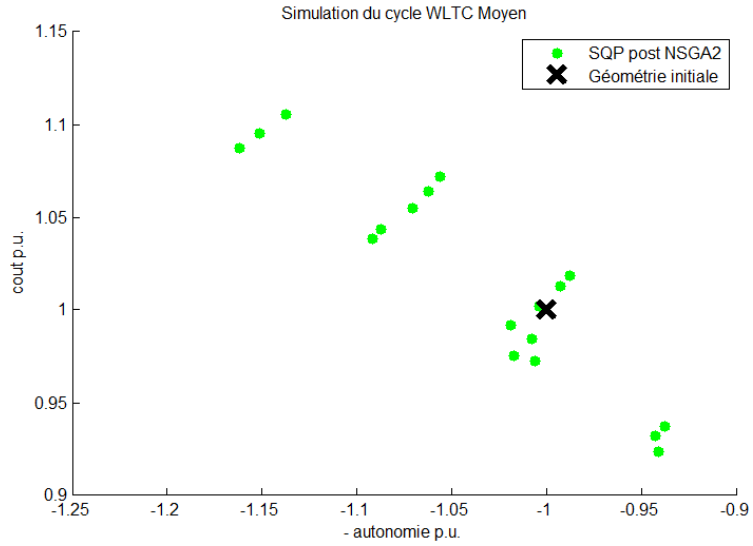


Figure 4.24 : Simulation des résultats précédents avec le cycle WLTC « Moyen »

Les solutions obtenues ne forment plus un front de Pareto: les dimensionnements optimaux pour WLTC « Bas » ne permettent pas nécessairement d'améliorer l'autonomie sur WLTC « Moyen ». Le cycle représentatif de l'usage client doit donc être choisi avec attention.

Par ces trois exemples de post-traitement des résultats, nous montrons que dans le cadre du développement d'un véhicule, chaque cas d'usage pourra être optimisé (type de client, climat du pays, perspectives de cout) afin de fournir les orientations et les bons compromis pour le pré dimensionnement du véhicule de série.

4.3.3.3 Faire un choix

Enfin, pour faire des choix le long des fronts de Pareto, les constructeurs établissent des courbes de valorisation kilométrique qui représente le cout que sont prêts à payer les clients pour gagner des kilomètres d'autonomie. Les courbes dépendent de la gamme de véhicules et sont asymptotiques : plus l'autonomie est grande, moins le surcout du kilomètre supplémentaire est élevé (Figure 4.25). Après transformation, ces courbes peuvent être superposées aux fronts de Pareto pour déterminer où le front est coupé. Toute la portion du front avant la coupure fait partie des solutions possibles, le point de coupure étant à priori le plus intéressant d'un point de vue cout/autonomie.

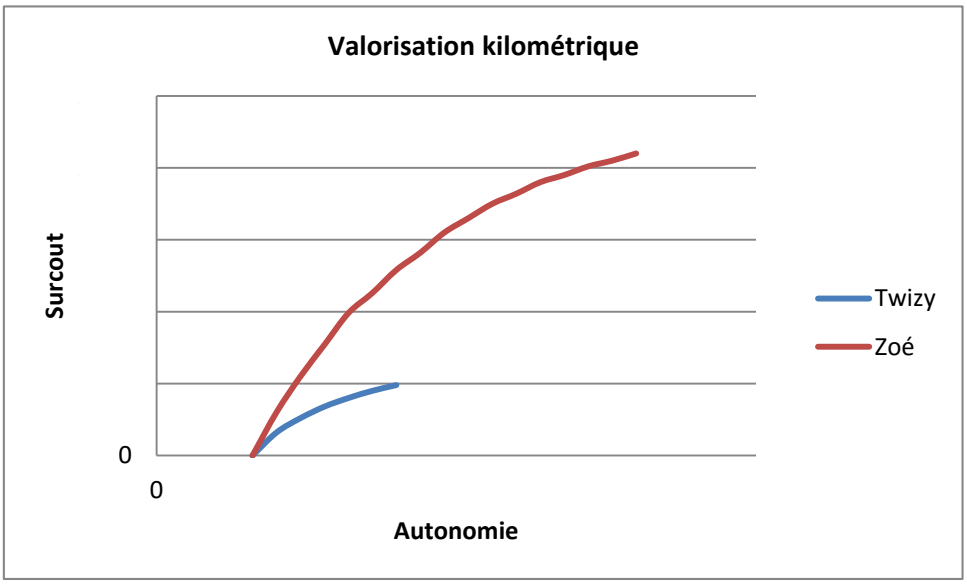


Figure 4.25 : Courbes de valorisation kilométrique

Les choix qui résultent de ces courbes sont très dépendants des hypothèses sur le cout des composants et des matériaux comme nous l'avons vu au paragraphe précédent.

4.4 Banc d'essai de la chaine de traction

Un banc d'essai a été mis en place au laboratoire L2ep avec un onduleur et une machine de Renault Twizy, financé par le Renault dans le cadre du projet COCTEL. L'objectif de ce banc est de valider les modèles et les méthodes d'un point de vue énergétique. La 1ère étape consiste à valider que la machine installée sur le banc corresponde bien à celle que nous avons paramétrée dans le modèle. Les paramètres du schéma équivalent, ainsi que des points en charge en régime permanent ont donc été comparés. Puis l'hypothèse qu'un cycle pouvant être considéré comme un enchainement de régimes permanents d'un point de vue électrique a été testé. Il s'agit ici de simuler un cycle de

roulage complet avec le modèle, donc par un enchainement de régimes permanents, puis avec le banc d'essai, nécessairement en dynamique.

4.4.1 *Description du banc*

Pour être en mesure de simuler des cycles de roulage avec des phases moteurs et générateurs, le moteur du Twizy doit être accouplé à un moteur de charge pour reproduire les points de fonctionnement du véhicule. Chaque moteur est alimenté par un onduleur pour le contrôle de la vitesse et du couple, lui-même alimenté par des sources de puissances. Des résistances de freinage permettent de dissiper l'énergie renvoyée par la machine qui fonctionnera en générateur. Les mesures sont réalisées par un analyseur de puissance et l'acquisition est faite au travers d'une MicroAutoBox. On obtient ainsi le schéma de principe de la Figure 4.26.

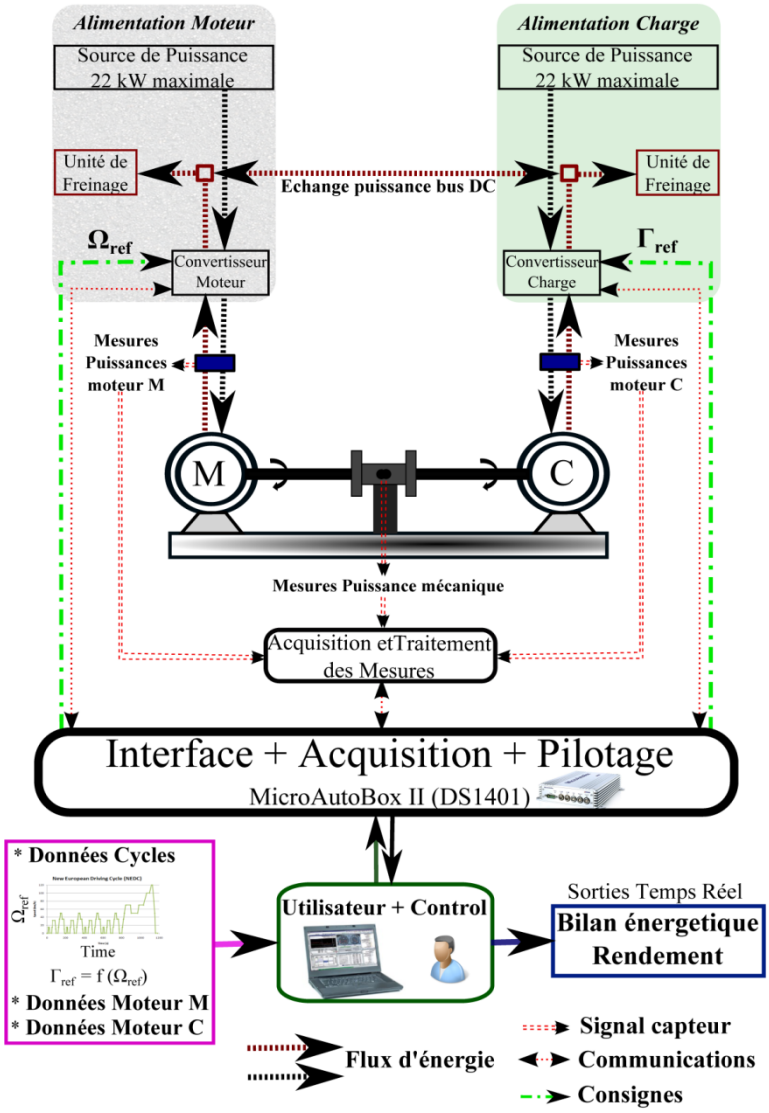


Figure 4.26 : Schéma de principe du banc

Le moteur du Twizy est commandé en vitesse alors que la charge est commandée en couple. La Figure 4.27 est une photo du banc avec les différents appareils utilisés. Trois éléments n'apparaissent pas distinctement sur cette photo : les deux résistances de charge ainsi que l'alimentation de l'onduleur de charge.

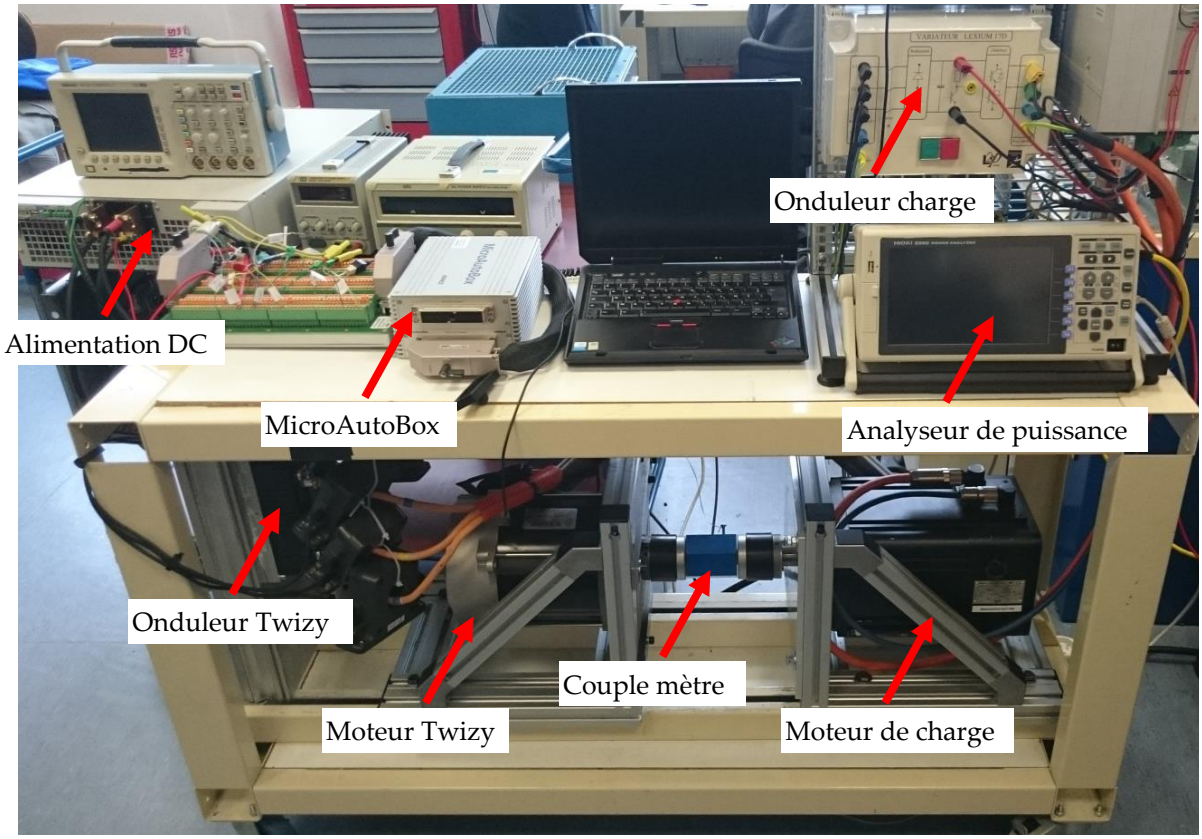


Figure 4.27 : Banc d'essai pour cycler

L'analyseur de puissance mesure :

- La puissance en sortie de l'alimentation DC ;
- La puissance en entrée du moteur du Twizy ;
- La vitesse de l'arbre avec le codeur du moteur du Twizy ;
- Le couple du couple mètre.

L'analyseur de puissance permet d'avoir toutes les puissances, en entrées et en sortie du moteur, mais également en entrée de l'onduleur. Toutes ces puissances sont obtenues avec le même échantillonnage ce qui facilite la réalisation de bilans de puissance sur cycle de fonctionnement.

4.4.2 Validation modèle machine

La première validation consiste à s'assurer que la machine montée sur le banc correspond bien à celle que nous avons modélisée. Les paramètres du schéma équivalent (Figure 2.20) ont été identifiés à partir des essais comme suit [GILL07]:

- La résistance statorique *r1* peut être mesurée directement ;

- La résistance rotorique *r2'* et l'inductance *l2* sont obtenues par calcul à partir d'un essai à rotor bloqué (glissement = 1) ;
- L'inductance et la résistance magnétisante *lm* et *rm* sont obtenus par un calcul à partir d'un essai à vide (glissement ~ 0) ;
- L'inductance statorique *l1* est supposée égale à *l2* dans les calculs.

Les paramètres du schéma équivalent calculés par le modèle ont également été comparés avec ceux calculés par l'outil analytique RMxprt® du logiciel Maxwell®. Les écarts par rapport au modèle sont reportés dans le Tableau 4.14.

Tableau 4.14 : Comparaison des paramètres du schéma équivalent entre modèle et essais

	Unité	Modèle	Essais	Ecart Modèe/Essai (%)	RMxprt	Ecart Modèle/RMxprt (%)
R1	mOhm	8.5	7.5	12	8.7	-2
R'2	mOhm	6.0	4.6	23	7.0	-18
L1	µH	39	38.8	1	40	-3
L2	µH	28.7	38.8	-35	35	-22
Rm	Ohm	8	6	25	6.8	15
Lm	mH	1.5	1.2	20	1.4	5

Quelle que soit la base de comparaison, les écarts sont conséquents sur certains paramètres. Ceci peut s'expliquer d'une part par les hypothèses réalisées pour le calcul des paramètres dans le modèle, mais également par l'identification à partir des essais qui nécessite d'autres hypothèses. Afin de voir l'impact de ces écarts sur des points de fonctionnement, des mesures en charge ont permis de comparer les rendements des essais avec le modèle pour un couple donné, en fonction de la vitesse (Figure 4.28). Ce couple est égal à 1/10 du couple maximum de la machine. Pour chaque point de fonctionnement, les tensions et fréquences mesurées ont été imposées en entrée du modèle analytique.

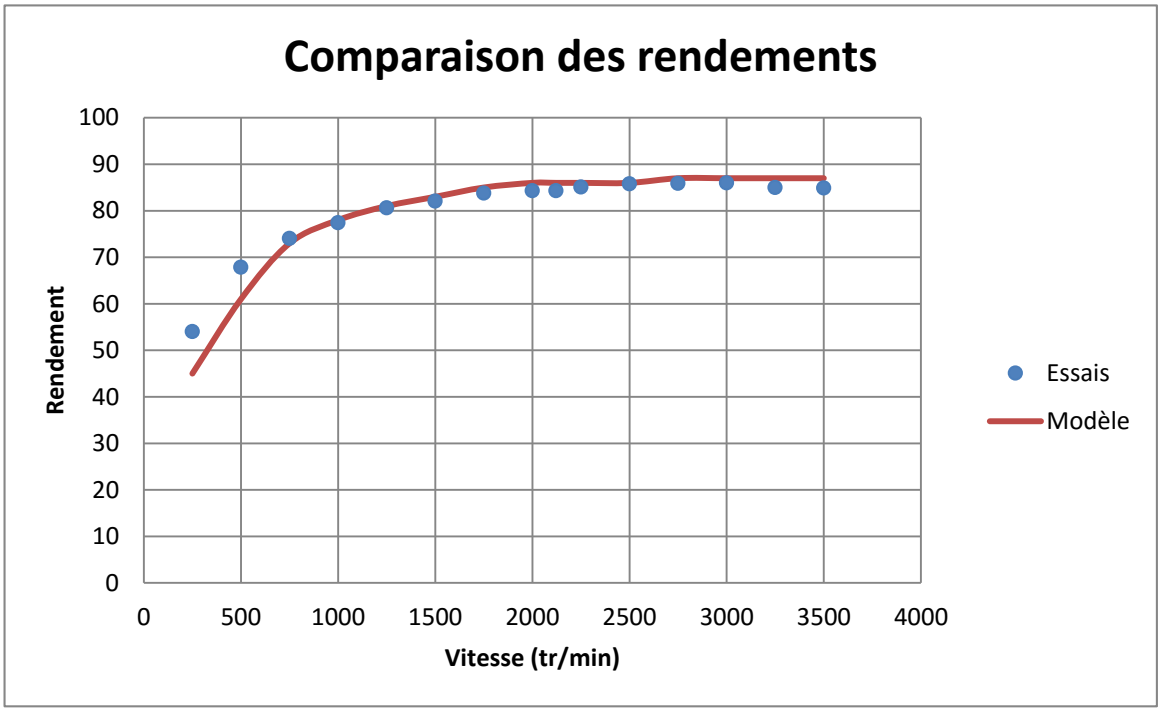


Figure 4.28 : Comparaison essais/modèle des rendements pour un couple donné

On observe ici que les tendances sont satisfaisantes et que les écarts apparaissent suffisamment faibles pour notre étude de pré-dimensionnement qui doit permettre de discriminer différentes solutions d'un point de vue énergétique.

4.4.3 Validation sur cycle

Le cycle WLTC « Bas » a été modifié afin de pouvoir être simulé sur le banc d'essai bridé en vitesse, en couple et en puissance :

- La vitesse maximum du moteur a été limitée à la vitesse maximum du banc (3500 tr/min) ;
- Le couple a été limité au couple maximum du couple mètre (10 Nm) ;
- La puissance a été bridée à la puissance maximum qu'il est possible de dissiper dans les résistances de freinage (4 kW).

Afin de conserver un cycle représentatif d'un fonctionnement sur véhicule, les modifications ont été effectuées sur la vitesse véhicule plutôt que sur les points de fonctionnement moteur. La Figure 4.29 représente le cycle WLTC « Bas » initial et celui modifié : la vitesse et les accélérations ont été bridées.

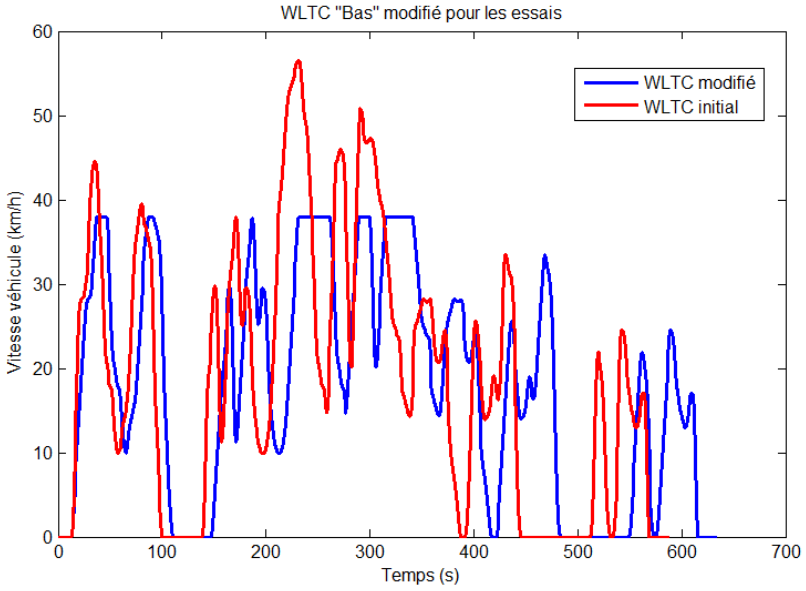


Figure 4.29 : Cycle WLTC « Bas » modifié

On obtient ainsi une consigne de vitesse qui est demandée au moteur du Twizy. La Figure 4.30 présente la consigne et la mesure de la vitesse machine. Un profil de couple est simultanément appliqué à la consigne du moteur de charge. La Figure 4.31 présente la consigne de couple et la mesure de du couple sur l'arbre.

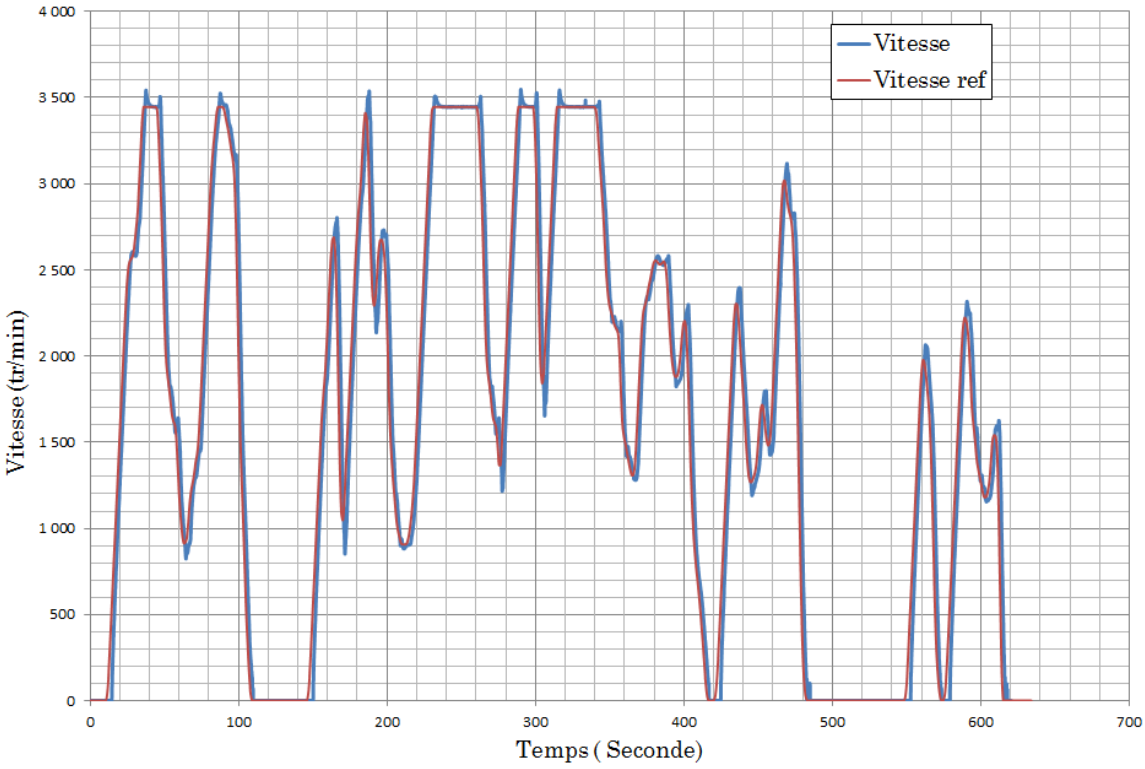


Figure 4.30 : Cycle de la vitesse moteur sur le banc

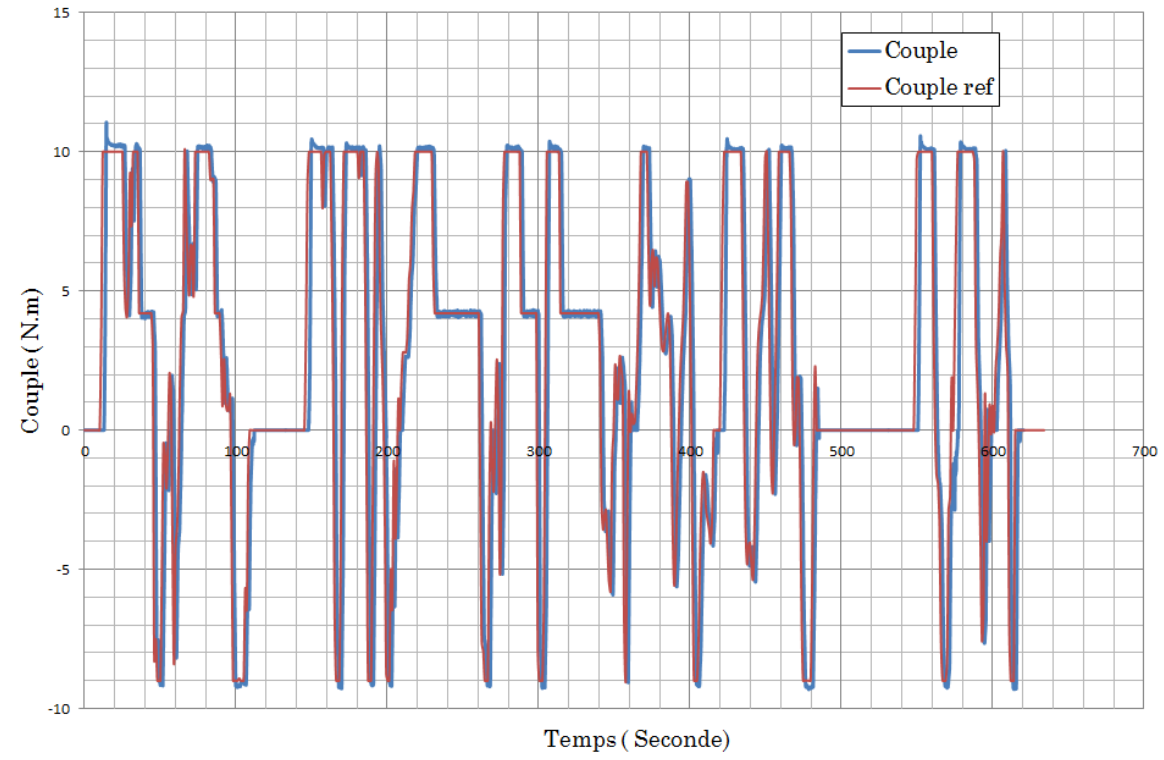


Figure 4.31 : Cycle du couple moteur sur le banc

Le banc respecte globalement bien les deux profils. Les petits dépassements observables en fin d'accélération relève d'un ajustement des correcteurs types PI. Pour pouvoir simuler ce cycle avec le modèle, il est nécessaire de faire un ajustement du couple: les accélérations et décélérations du cycle donnent un couple supplémentaire lié à l'inertie des parties tournantes. Si ce cycle est simulé avec le modèle, directement au niveau de la machine sans intégrer les inerties prises en compte dans le modèle véhicule, le couple simulé sera sous-estimé. L'inertie du banc a donc été mesurée par un essai de lâcher (détails en Annexe B): le moteur est amené à 3500tr et la courbe de décélération de la vitesse Ω_{mot} en fonction du temps enregistrée, ainsi que le couple résistant C_r. L'inertie du banc Jb est ensuite calculée par :

$$J_b \times \frac{d\Omega_{mot}}{dt} = C_r \tag{4.3}$$

La Figure 4.32 compare les essais au modèle d'un point de vue de l'énergie consommée au moteur du Twizy. On observe l'importance de prendre en compte l'inertie du banc dans les calculs pour obtenir une bonne estimation de l'énergie consommée.

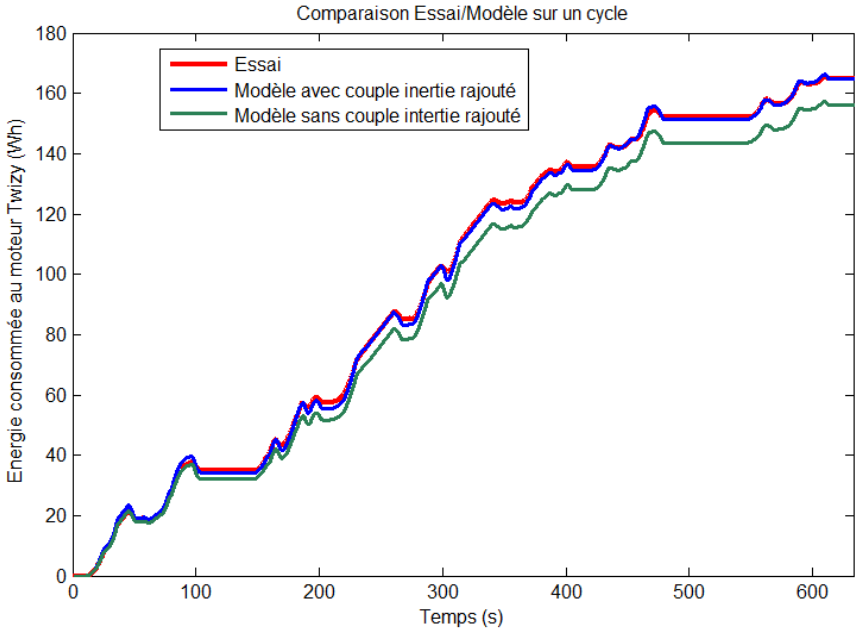


Figure 4.32 : Comparaison Essai/Modèle sur le cycle WLTC « Bas »

Les écarts entre le modèle et l'essai sont faibles et valident à la fois le modèle, et l'hypothèse de considérer le cycle comme un enchainement de régimes permanents électriques avec la dynamique propre à un véhicule. D'autres résultats de ces essais sont présentés en Annexe B : courbes de puissances en fonction du temps, rendement moteur et rendement onduleur. Les points performances n'ont pas pu être simulés sur le banc d'essai à cause de limites en vitesse, couple et puissance plus faibles que la machine.

4.5 Bilan

Dans ce chapitre nous avons commencé par lister les éléments de notre problème d'optimisation. Le cycle choisi est WLTC « Bas », simplifié en 4 points. Les performances à respecter sont représentées par 3 points. Le problème comprend 2 objectifs, l'autonomie sur le cycle et le cout de la chaine de traction, 33 variables dont 8 discrètes et 25 continues ainsi que 62 contraintes.

Une étude de sensibilité a été effectuée sur ce cas test avec l'outil de la corrélation de Spearman. Cela a fait ressortir comme prévu, l'influence prépondérante de la taille de la batterie sur nos objectifs et a permis d'écarter 4 variables continues.

Un premier jeu d'optimisations (O1, O2, O3) a permis de mettre en valeur le modèle système :

- Une optimisation des pertes machines avec des variables machines a dégradé nos objectifs autonomie et cout par rapport à la géométrie initiale ;
- Une optimisation de l'autonomie permet bien d'améliorer l'autonomie, avec le même jeu de variable : c'est le gros intérêt du modèle système, il garantit un gain qui ne sera pas perdu sur un autre composant ;

- Une optimisation de l'autonomie avec des variables réducteur et batterie en plus des variables machine permet d'améliorer à nouveau nos objectifs.

Cette comparaison démontre parfaitement la pertinence d'une optimisation système plutôt que composant.

Un deuxième jeu d'optimisations (O4, O5, O6, O7) a été étudié pour pouvoir intégrer les variables mixtes. Deux algorithmes ont été utilisés : Branch&Bound et NSGA2. Ils nous ont permis tous les deux d'obtenir des fronts de Pareto cohérents, mais NSGA2 est beaucoup plus rapide. Pour avoir un résultat plus précis, nous avons choisi d'utiliser SQP sur les variables continues en fixant les variables discrètes avec les résultats de NSGA2.

Un dernier jeu d'optimisation (O8, O9, O10, O11) a permis de tester le problème complet avec les variables mixtes, en lançant NSGA2 puis SQP. Les résultats montrent un enchainement de petits fronts de Pareto correspondant chacun à une configuration de la batterie. L'autonomie est améliorée de 5% pour un même cout de la chaine de traction. Le processus a duré 1h seulement grâce aux méthodes développées dans ce travail et répond ainsi à notre problématique initiale d'un dimensionnement amont pour trouver les meilleurs compromis et devant se faire en un temps très raisonnable pour pouvoir rejouer d'autres optimisations en fonction des échanges avec les besoins de chaque métier. Une étude de robustesse sur les résultats obtenus montre l'impact de certains facteurs comme le cout des batteries ou le cycle de roulage : il est nécessaire de refaire des optimisations lorsque ces facteurs évoluent.

Enfin un banc d'essai a été mis en place au laboratoire avec la machine et l'onduleur du Renault Twizy pour valider les modèles et les hypothèses. Des écarts apparaissent sur l'identification de la machine, mais la comparaison de points de fonctionnement montre un bon accord entre essais et modèles. Ce banc d'essai a permis de vérifier l'hypothèse de simuler des points de fonctionnement par un enchainement de régimes permanents électriques. Le banc mis en place permet de jouer des cycles de roulage avec des phases en moteur et en générateur. La comparaison de l'énergie nécessaire sur ce cycle est très proche entre essai et modèle, validant ainsi l'hypothèse des régimes permanents.

Conclusion et perspectives

Conclusion générale

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la conception par optimisation d'un système du génie électrique : une chaine de traction de véhicule électrique. Nous nous sommes placés dans la phase amont du développement d'un projet pour proposer une approche de conception prenant en compte simultanément le composant, le système, son contrôle et son environnement. Cette démarche permet de faire émerger les meilleurs compromis pour faire des choix lorsque les degrés de liberté accessibles au concepteur sont encore importants.

Dans un premier chapitre, nous avons présenté les enjeux environnementaux liés au véhicule électrique et les leviers d'amélioration envisagés pour baisser les couts et augmenter l'autonomie qui restent des critères limitants. Notre travail concerne le levier d'amélioration de la chaine de traction électrique et ces deux critères seront nos objectifs de conception par optimisation. Puis nous avons décrit la chaine de traction du Renault Twizy : réducteur, machine asynchrone, onduleur avec des MOSFET et batterie lithium-ion. Notre travail se situe en amont du cycle en V, dans une phase de pré-dimensionnement qui permettra de trouver les bons compromis pour faire des choix. Dans ce cadre nous avons orienté notre travail vers une méthode de conception par optimisation plutôt que de dimensionnement pur afin d'explorer au mieux l'espace des possibilités. Trois axes de recherche ont ainsi été définis : la conception optimale systémique, l'intégration des contraintes liées aux différentes physiques du système et la réduction du temps de calcul.

Nous avons consacré le second chapitre à la modélisation du système. Dans un premier temps nous avons comparé les niveaux de modélisation utilisés en génie électrique. Nous avons sélectionné des modèles analytiques rapides pour la modélisation système plutôt que semi-analytique ou éléments finis. Au niveau des échelles temporelles, nous avons considéré les grandeurs sinusoïdales et exploité des grandeurs efficaces. On peut parler ici de régime permanent électrique. En parallèle, l'échelle mécanique du véhicule est représentée par un enchainement de points discrétisé à la seconde. Enfin l'enchainement des modèles a été étudié ; nous avons choisi de ne pas respecter la causalité pour simplifier notre problème, car nous ne cherchons pas à étudier la commande dynamique d'un système connu. Une seconde section détaille les modèles de chaque composant. Le modèle du véhicule permet de convertir le cycle de roulage en vitesse et couple à la roue, à partir des équations de la mécanique qui estiment les forces : de frottement de l'air, des pneus et de l'accélération. Le modèle de la transmission dissocie les pertes par dentures et par trainée. Pour ces dernières, la modélisation est basée sur des résultats d'essais. L'influence de la température d'huile

est intégrée au modèle. Le modèle de la machine est basé sur un schéma équivalent monophasé qui inclue la saturation et les pertes fer. Ce modèle impose donc l'hypothèse de calcul au premier harmonique. La modélisation du moteur a été comparée à une modélisation plus fine (par éléments finis) qui a permis de valider notre modèle sur le cas du moteur existant du Twizy. Le contrôle énergétique qui propose un degré de liberté a été explicité. Un modèle thermique par réseau de résistances thermiques a été mis en place afin de pouvoir simuler des régimes permanent et transitoire. Le modèle d'onduleur décompose les pertes par conduction et par commutation dans les diodes et les transistors. Un modèle thermique très simplifié permet des simulations en régime permanent. Le modèle de batterie est un modèle électrique en « E-RI » avec des cartographies de tension à vide et résistance interne dépendantes de l'état de charge et de la température. Enfin un modèle d'estimation de la masse et du cout est intégré pour chaque composant. La dernière section décrit l'assemblage des modèles et donne des résultats de simulations du modèle système, c'est-à-dire l'évaluation de la baisse de l'état de charge en fonction du temps lors de la simulation d'un cycle de roulage. Une étude paramétrique permet de voir l'impact important sur l'autonomie de certains facteurs comme le cycle de roulage, l'état de charge ou la température de la batterie.

Après avoir détaillé le modèle système, nous avons détaillé les méthodes qui nous ont permis de mettre en place une architecture d'optimisation dans le troisième chapitre. Nous avons d'abord fait un état de l'art des algorithmes, méthodes et stratégies d'optimisation. Notre travail ne porte pas sur les algorithmes, mais sur les stratégies qui vont permettre de jouer avec la structure du problème. Nous avons ainsi détaillé et comparé des stratégies possibles pour gérer la conception par optimisation. Un premier bilan du temps de calcul a été effectué et montre que la durée d'une optimisation peut très vite dépasser 24 h bien que nous utilisons des modèles analytiques simples. Les axes méthodologiques étudiés dans ce chapitre portent principalement sur la réduction du temps de calcul. Nous avons établi que le degré de liberté sur le contrôle énergétique de la machine doit être intégré, en minimisant les pertes, pour notre phase de conception. Ce contrôle optimal est obtenu par une boucle d'optimisation pour chaque point de fonctionnement qui allonge fortement les temps de calcul. Nous avons choisi de simplifier le cycle en un nombre réduit de points de fonctionnement pour accélérer le calcul. A partir de ce cycle simplifié, nous avons pu transformer notre problème biniveau, avec des boucles d'optimisation du contrôle imbriquées dans l'optimisation de la géométrie, en un problème mononiveau. Les résultats sont quasi identiques pour ces deux stratégies alors que la stratégie mononiveau a été 30 à 50 fois plus rapide. La gestion de la thermique pour la machine électrique a ensuite été étudiée. Nous avons choisi de ne simuler que la thermique en régime permanent, bien plus rapide, pendant l'optimisation, et de vérifier le cahier des charges en thermique transitoire sur la géométrie obtenue par l'optimiseur. Pour gérer le bouclage induit par la thermique, la stratégie MDF a été retenue, car le nombre d'itérations nécessaire est faible. Les autres boucles algébriques de notre problème, sur la batterie, l'onduleur et la masse sont gérées de la même façon. D'autre part, certaines contraintes de notre problème ne sont pas calculées par le modèle analytique, par exemple le bruit ou les oscillations de couple de la machine. Pour les intégrer, une stratégie d'apprentissage automatique a été mise en place. Cette stratégie, nouvelle au domaine électromagnétique, a été choisie pour pouvoir gérer efficacement les variables discrètes telles que les nombres d'encoches de la machine, dont l'impact sur les oscillations de couple par exemple ne peut pas être géré par une surface de réponse classique. Les simulations par éléments finis permettent également une correction du modèle analytique effectué par stratégie de output space mapping. Une

fois ces stratégies associées, nous obtenons une architecture d'optimisation qui permet de faciliter la conception en répondant à nos enjeux d'un dimensionnement en amont du cycle en V : optimiser rapidement une chaine de traction d'un point de vue autonomie sur cycle et cout, tout en respectant des performances pour le véhicule ainsi que les contraintes physiques des composants.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons des résultats d'optimisation à partir de l'architecture développée. Notre problème comprend 2 objectifs, l'autonomie sur le cycle et le cout de la chaine de traction, 33 variables dont 8 discrètes et 25 continues ainsi que 62 contraintes. Une étude de sensibilité a fait ressortir comme prévu l'influence prépondérante de la taille de la batterie sur nos objectifs et a permis d'écarter certaines variables peu influentes. Un premier jeu d'optimisations a permis de mettre en valeur le modèle système : avec le même modèle, si nous optimisons les pertes machine plutôt que l'autonomie, nous dégradons l'autonomie du véhicule, car le gain est perdu sur les autres composants. Un deuxième jeu d'optimisations a été étudié pour pouvoir intégrer les variables mixtes. Nous avons choisi d'utiliser l'algorithme NSGA2 sur toutes les variables puis de lancer SQP sur les variables continues en fixant les variables discrètes avec les résultats de NSGA2. Cette hybridation des algorithmes offre sur notre problème un bon compromis entre précision et temps de calcul. Un dernier jeu d'optimisation a permis de tester le problème complet. L'autonomie est améliorée de 5% pour un même cout de la chaine de traction. Pour obtenir le front de Pareto, le processus a seulement duré 1h grâce aux méthodes développées dans ce travail, sans utiliser de supercalculateur. Enfin un banc d'essai a été mis en place au laboratoire avec la machine et l'onduleur du Renault Twizy pour valider les modèles et les hypothèses. Ce banc d'essai a permis de vérifier les modèles et de valider le fait de simuler des points de fonctionnement par un enchainement de régimes permanents électriques était pertinent pour notre cas d'application: la comparaison de l'énergie nécessaire sur un cycle est en effet très proche entre essai et modèle.

En conclusion, nous avons pu répondre à notre problématique de conception par optimisation d'une chaine de traction électrique en phase amont du développement en mettant en place une architecture d'optimisation permettant d'intégrer l'autonomie sur cycle, le cout, des contraintes de performances pour le véhicule et des contraintes physiques pour les composants, ainsi que le contrôle de la machine. La résolution de ce problème bi objectif non linéaire aux variables mixtes et multiples contraintes a été possible en mettant en place des stratégies d'optimisation permettant de conserver un temps de calcul raisonnable, sans utiliser de supercalculateur. Les résultats sont des fronts de Pareto qui permettent de juger des meilleurs compromis entre cout et autonomie en fonction des besoins des projets.

Perspectives

Les perspectives de ce travail portent d'abord sur l'extension des modèles à d'autres technologies pour permettre justement de les comparer à l'échelle du système. Il peut s'agir d'intégrer une boite de vitesse à plusieurs rapports avec un degré de liberté supplémentaire pour le contrôle. Pour les machines électriques, les technologies à aimant et/ou à réluctance sont des pistes potentielles d'amélioration et ne peuvent pas toujours être modélisées avec un modèle analytique rapide et performant. Un travail méthodologique sur le temps de calcul doit alors être réalisé pour ces cas

particuliers. Au niveau onduleur, notre modèle nécessiterait d'être complété pour apporter d'autres compromis. Par exemple l'interaction onduleur/machine à l'échelle des harmoniques de courant est une perspective de développement qui demande un travail sur les modèles et sur les temps de calcul. Enfin la sélection d'une chimie de batterie relève de nombreux critères comme le vieillissement que nous n'avons pas modélisé ici. En parallèle la thermique est un élément dimensionnant pour tous les composants et pourrait être modélisée plus finement de manière systématique. Les compromis possibles au niveau du cout des composants de refroidissement sont un aspect important pour la chaine de traction ; par exemple vaut-il mieux une pompe plus grosse qui refroidirait mieux ou un composant plus gros qui chaufferait moins ?

Plus généralement, ce travail ouvre des perspectives sur les associations entre modèles et processus d'optimisation afin de construire des outils d'aide à la décision pour la phase amont d'une conception à l'échelle du système.

Références bibliographiques

Publications dans le cadre de la thèse par ordre chronologique :

P. Caillard, F. Gillon, M. Hecquet, and N. Janiaud, "Influence of machine control strategy on electric vehicle range," in *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2013.

P. Caillard, F. Gillon, M. Hecquet, and N. Janiaud, "Electric machine sizing optimization including control strategy and driving cycle applied to electric vehicle," in *International Symposium on Electromagnetic Fields (ISEF)*, 2013.

P. Caillard, F. Gillon, M. Hecquet, S. Randi, N. Janiaud, and C. S. Villeneuve, "Mono and bi level optimization architecture for electric vehicle powertrain design," in *Optimization and Invverse Problems in Electromagnetism (OIPE)*, 2014.

P. Caillard, F. Gillon, S. Randi and N. Janiaud, "An optimization methodology to pre design an electric vehicle powertrain," in *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2014.

P.-H. Arnoux, P. Caillard, and F. Gillon, "Modeling finite element constraint to run an electrical machine design optimization using machine learning," *IEEE Transactions on magnetics,* vol 51, no. 3, 2015.

Références :

[AGBG12] R. Ben Ayed, J. Gong, S. Brisset, F. Gillon, and P. Brochet, "Three-Level Output Space Mapping Strategy for Electromagnetic Design Optimization," *IEEE Transactions on magnetics*, vol. 48, no. 2, pp. 671–674, 2012.

[AÏCH15] L. Aïchi, *Cout économique et financier de la pollution de l'air*, . 2015.

[ANSY14] Ansys, "Low-Frequency Electromagnetics," *ANSYS LF Electromagnetics 15.0 Overview*, 2014. [Online]. Available: http://www.ansys.com/Products/ANSYS+15.0+Release+Highlights/LF+Electromagnetics. [Accessed: 08-Jan-2015].

[ARCG14] P.-H. Arnoux, P. Caillard, and F. Gillon, "Modeling finite element constraint to run an electrical machine design optimization using machine learning," in *CEFC*, 2014.

[ARNO13] P.-H. Arnoux, *Intégration d'un modèle éléments finis dans un outil d'optimisation multi-physique globale d'une chaine de traction de véhicule électrique*. Mémoire de Master, 2013.

[AYFY14] L. Ahmadi, A. Yip, M. Fowler, S. B. Young, and R. A. Fraser, "Environmental feasibility of re-use of electric vehicle batteries," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 6, pp. 64–74, 2014.

[BABA01] M. H. Bakr and J. W. Bandler, "An Introduction to the Space Mapping Technique," *Optimization and Engineering*, vol. 2, pp. 369–384, 2001.

[BAGH05] L. Baghli, "Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone - notes de cours.", 2005.

[BCLP03] 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.

[BEKN14] F. De Belie, X. Keystelyn, and N. K. Nguyen, "Fault-Tolerant Optimal-Current Torque-Controlled Five-Phase PMSMs with Open-Circuited Phases : Position Self-Sensing Operation," in *VPPC*, 2014.

[BERB12] A. C. Berbecea, "Approches multi - niveaux pour la conception systémique optimale des chaînes de traction ferroviaire," EC-Lille - USTL, 2012.

[BESN08] J. Le Besnerais, "Réduction du bruit d'origine magnétique dans une machine asynchrone alimentée par MLI - règles de conception silencieuse et optimisation multi-objectif," EC-Lille - USTL, 2008.

[BLHA14] D. Block and J. Harrison, *Electric Vehicle Sales and Future Projections*. Cocoa, Florida, USA , 2014.

[BOOL97] R. P. Bouchard and G. Olivier, *Conception de Moteurs Asynchrones Triphases*. Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, 1997.

[BOSS14] A. Van den Bossche, "Diverse Influence Factors on the Range of Electric Vehicles," in *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2014.

[BOTS09] I. Boldea, L. N. Tutelea, and S. State, *Electric Machines: Steady State, Transients, and Design with MATLAB*. Taylor & Francis, 2009.

[BOUS03] A. Bouscayrol, "Formalismes de representation et de commande appliques aux systemes electromecaniques multimachines multiconvertisseurs," USTL, 2003.

[BPDJ10] L. Bedeau, J. Piquandet, S. Duhantois, and E. Jonsson, *Les Français et les nuisances sonores*. 2010.

[BRIS07] S. Brisset, "Démarches et Outils pour la Conception Optimale des Machines Electriques," EC-Lille - USTL, 2007.

[BRKR95] R. D. Braun and I. M. Kroo, "Development and Application of the Collaborative Optimization Architecture in a Multidisciplinary Design Environment," *Multidisciplinary Design Optimization: State of the Art*, pp. 98–116, 1995.

[BRUN90] X. Brunotte, “Methode des integrales de frontieres pour les problemes magnetiques a symetrie axiale et couplage avec la methode des elements finis,” *Revue de Physique appliquee*, vol. 25, no. 7, pp. 613–626, 1990.

[CAAP14] M. Carteret, M. André, and A. Pasquier, “Evaluation de la composition du parc automobile en Ile-de-France pour le calcul des émissions de polluants liés au trafic routier,” *N°221*, 2014. [Online]. Available: http://lodel.irevues.inist.fr/pollution-atmospherique/index.php?id=4342. [Accessed: 07-Feb-2014]

[CACA14] P. Caillard and J. Callac, *Détails d’un modèle de pertes réducteur basé sur des essais.* Note interne Renault n°68045/2014/17, 2014.

[CANT12] M. Cantegrel, “Vers une conception optimale des chaînes de traction ferroviaire,” EC-Lille - USTL, 2012.

[CGBR08] C. Ciurtin, F. Gillon, P. Brochet, and M. Radulescu, “Nonlinear magnetic circuit model of an axial flux switched reluctance motors,” in *EPNC*, 2008.

[CGHJ13] P. Caillard, F. Gillon, M. Hecquet, and N. Janiaud, “Influence of machine control strategy on electric vehicle range,” in *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2013.

[CGHR14] P. Caillard, F. Gillon, M. Hecquet, S. Randi, N. Janiaud, and C. S. Villeneuve, “Mono and bi level optimization architecture for electric vehicle powertrain design,” in *OIPE*, 2014.

[CGRJ14] P. Caillard, F. Gillon, S. Randi, N. Janiaud, and R. Technocentre, “An optimization methodology to pre design an electric vehicle powertrain,” in *VPPC*, 2014.

[CHAN02] C. C. Chan, “The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 2, pp. 247–275, 2002.

[CHAN14] C. C. Chan, “Renaissance and global EV development,” in *VPPC*, 2014.

[CHEN92] S. Chen, Sen Nian Yeh, “Optimal efficiency analysis of induction motors fed by variable-voltage and variable-frequency source,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 7, no. 3, pp. 537–543, 1992.

[CHWL14] L. Chen, J. Wang, and P. Lazari, “Influence of driving cycles on traction motor design optimizations for electric vehicles,” in *Transport Research Arena*, 2014.

[COSI02] Y. Collette and P. Siarry, *Optimisation multiobjectif*. Editions Eyrolles, 2002.

[DACS13] D. T. Danielson, S. Chu, and D. Sandalow, *EV everywhere, grand challenge blueprint*. In Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), 2013.

[DEHO14] S. Delprat and T. Hofman, “Hybrid vehicle optimal control : linear interpolation and singular control,” in *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2014.

[DELI11] B. Delinchant, “La CAO et l’optimisation de systèmes, une approche par couplages dynamiques de composants,” Université de Grenoble, 2011.

[DPAM02] 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.

[EDHL89] T. F. Edgar, D. M. Himmelblau, and L. Lasdon, *Optimization of chemical processes*. McGraw-Hill, 1989.

[EHFL12] M. Ehsani, M. Falahi, and S. Lotfifard, "Vehicle to Grid Services: Potential and Applications," Energies, vol. 5, no 10, pp. 4076–4090, 2012.

[EHGE10] M. Ehsani, Y. Gao, and A. Emadi, *Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles*. CRC press, 2010.

[EMEM03] C. Espanet et al., "Modélisation analytique et maximisation de l'induction magnétique à vide d'un moteur à aimants permanents montés en surface," in *Electrotechnique du futur (EF)*, 2003.

[EMSS13] L. A. Ellingsen, G. Majeau-bettez, B. Singh, A. K. Srivastava, L. O. Valøen, and A. H. Strømman, "Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack," *Journal of industrial ecology*, vol. 18, no. 1, pp. 113–124, 2013.

[FAKA14] M. Fakam, "Dimensionnement vibro-acoustique des machines synchrones à aimants permanents pour la traction ferroviaire - règles de conception silencieuse," EC-Lille - USTL, 2014.

[FALA15] M. Fakam and V. Lanfranchi, "Magnetic Noise Design of the Interior Permanent Magnet Synchronous Machine," in *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2015.

[FBLD07] A. Fontaine, Y. Bonvalot, T.-A. Lim, M. Duée, V. Pernelet-Joly, and A. Thuret, *Impacts économiques des pathologies liées à la pollution: étude d'impact sur les coûts que représentent pour l'Assurance maladie certaines pathologies liées à la pollution*. 2007.

[FOST07] L. Fostier, *Cours - Calcul d'un moteur asynchrone*. HEI, 2007.

[GBEG13] E. Gbegbaje-Das, *Life cycle CO2 Assessment of low carbon cars 2020-2030*. 2013.

[GEGS07] P. S. Georgilakis, A. T. Gioulekas, and A. T. Souflaris, "A decision tree method for the selection of winding material in power transformers," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 181, pp. 281–285, 2007.

[GILL07] F. Gillon, *Cours - Les machines Asynchrones*. EC-Lille, 2007.

[GILL09] F. Gillon, "Methodologies de conception optimale des composants electromagnetiques," EC Lille - USTL, 2009.

[GIMS05] P. E. Gill, W. Murray, and M. A. Saunders, "SNOPT : An SQP Algorithm for Large-Scale Constrained Optimization," *Society for Industrial and Applied Mathemarics*, vol. 47, no. 1, pp. 99–131, 2005.

[GRLA06] P. Griset and D. Larroque, *L'odyssée du transport électrique*. Cliomédia, 2006.

[GRME10] P. Gruber and P. Medina, “Global lithium availability: a constraint for electric vehicles,” University of Michigan, 2010.

[GRPÜ06] D. Graovac and M. Pürschel, *MOSFET Power losses calculation using the data-sheet parameters*, Infineon application note, 2006.

[GUSC05] L. Guzzella and A. Sciarretta, *Vehicle propulsion systems*, vol. 2. Springer, 2005.

[HAMI93] D. C. Hamill, “Lumped equivalent circuits of magnetics components: the gyrator-capacitor approach.pdf,” *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 8, no. 2, pp. 97–103, 1993.

[HERZ10] R. Herzog, *Cours - Simulation de systèmes mécatroniques*. Heig-vd, 2010.

[HJHH11] H. Helms, J. Jöhrens, J. Hanusch, U. Höpfner, U. Lambrecht, and M. Pehnt, *Umbrela, Umweltbilanzen Elektromobilität*. Heidelberg, 2011.

[HKNL08] M. J. Hill, R. F. Kunz, R. W. Noack, L. N. Long, P. J. Morris, and R. F. Handschuh, “Application and Validation of Unstructured Overset CFD Technology for Rotorcraft Gearbox Windage Aerodynamics Simulation,” in *Annual Forum of the American Helicopter Society*, 2008.

[HWYF14] C. Heymans, S. B. Walker, S. B. Young, and M. Fowler, “Economic analysis of second use electric vehicle batteries for residential energy storage and load-levelling,” *Energy Policy*, vol. 71, pp. 22–30, 2014.

[JACQ06] J. Jacques, “SAinterface.” ERIC, Université de Lyon, 2006.

[JANI11] N. Janiaud, “Modélisation du système de puissance du véhicule électrique en régime transitoire en vue de l’optimisation de l'autonomie, des performances et des coûts associés.,” Supelec, 2011.

[JANN10] X. Jannot, “Modélisation et optimisation d’un ensemble convertisseur-machine Application aux systèmes d'entraînement à haute vitesse,” Supelec, 2010.

[JAWC11] D. Jauregui, B. Wang, and R. Chen, *Power Loss Calculation With Common Source Inductance Consideration for Synchronous Buck Converters*, Texas Instruments, SLPA009A, 2011.

[JICS01] R. Jin, W. Chen, and T. W. Simpson, “Comparative studies of metamodeling techniques under multiple modeling criteria,” *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2001.

[JLWZ14] D. Ji et al., “The heaviest particulate air-pollution episodes occurred in northern China in January , 2013 : Insights gained from observation,” *Atmospheric Environment*, vol. 92, pp. 546–556, 2014.

[JOPS00] V. H. Johnson, A. A. Pesaran, and T. Sack, “Temperature-Dependent Battery Models for High-Power Lithium-Ion Batteries,” in *EVS*, 2000.

[KAUK10] M. Kanechika, T. Uesugi, and T. Kachi, “Advanced SiC and GaN Power Electronics for Automotive Systems,” in *Electron devices Meeting (IEDM)*, 2010.

[KETO05] W. Kempton and J. Tomi, "Vehicle-to-grid power implementation : From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy," *Journal of Power Sources*, vol. 144, pp. 280–294, 2005.

[KIMA96] I. Kioskeridis and N. Margaris, "Loss Minimization in Induction Motor Adjustable-Speed Drives," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 43, no. 1, pp. 226–231, 1996.

[KISC14] K. Kiyota, H. Sugimoto, and A. Chiba, "Comparing Electric Motors," *IEEE Industry applications magazine*, no. April, 2014.

[KRCM12] G. Krebs, E. De Cecco, and C. Marchand, "Design approach of an axial flux motor for electrical powertrain vehicle," in *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2012.

[KREU08] S. Kreuawan, "Modelling and optimal design in railway applications," EC-Lille - USTL, 2008.

[LATT13] D. Lattimer, "highly integrated and efficient lightweight direct drives for electric vehicles," in *European Conference on Nanoelectronics and Embedded Systems for Electric Mobility*, 2013.

[LBLD10] T. Letrouvé, A. Bouscayrol, W. Lhomme, N. Dollinger, and F. M. Calvairac, "Different models of a traction drive for An electric vehicle simulation," in *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2010.

[LICH67] M. Liwschitz-Garik and J. D. Chatelain, *Calcul des machines électriques*, vol. 1, SPES ; Dunod Paris, 1967.

[LIN11]S. LIN, "NGPM -- A NSGA-II Program in Matlab." 2011. [Online]. Available: http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/31166-ngpm-a-nsga-ii-program-in-matlab-v1-4 [Accessed: 09-Dec-2015].

[LISO04] F. Libert and J. Soulard, "Investigation on Pole-Slot Combinations for Permanent-Magnet Machines with Concentrated Windings," in *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2004.

[MAGM07] G. Mastinu, M. Gobbi, and C. Miano, *Optimal design of complex mechanical systems: with applications to vehicle engineering*. Springer Science & Business Media, 2007.

[MAPS94] L.-Y. Maystre, J. Pictet, and J. Simos, *Méthodes multicritères ELECTRE*, PPUR presses polytechniques, 1994.

[MERT91] P. H. Mellor, D. Roberts, and D. R. Turner, "Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design," *IEEE Electric Power Applications*, vol. 138, no. 5, pp. 205–218, 1991.

[MEŞT07] V. Meşter, "Conception optimale systemique des composants des chaines de traction electrique," EC-Lille - USTL, 2007.

[MIKP99] N. Michelena, H. M. Kim, and P. Y. Papalambros, "A system partitioning and optimization approach to target cascading," in *International conference on engineering design*, 1999.

[MOUS09] F. Moussouni-Messad, "Methodologie et algorithmes adaptes a l'optimisation multi-niveaux et multi-objectif de systemes complexes," EC-Lille - USTL, 2009.

[MUYE12] S. M. Muyeen, *Wind Energy Conversion Systems*. Springer, 2012.

[NEME65] J. A. Nelder and R. Mead, "A simplex method for function minimization," *The computer journal*, vol. 7, no. 4, pp. 308–313, 1965.

[NOWR99] J. Nocedal, S. J. Wright, and S. M. Robinson, *Numerical Optimization*. Springer Science & Business Media, 1999.

[PARK04] J.-M. Park, "Evolution of power semiconductor devices," TU WIEN, 2004. [Online]. Available: http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/park/node14.html. [Accessed: 27-Jan-2015].

[PBKM14] M. Pallas, M. Bérengier, J. Kennedy, P. Morgan, and S. Gasparoni, "Noise emission levels for electric and hybrid vehicles — First results of the FOREVER project," in *Transport Research Arena*, 2014.

[PIER14] A. Pierquin, "Conception de systemes electriques multidynamiques par optimisation multigranularité," EC-Lille - USTL, 2014.

[PVBG12] G. Pellegrino, A. Vagati, B. Boazzo, and P. Guglielmi, "Comparison of Induction and PM Synchronous Motor Drives for EV Application Including Design Examples," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 6, pp. 2322–2332, 2012.

[PYJH09] J. Pyrhonen, T. Jokinen, and V. Hrabovcova, *Design of Rotating Electrical Machines*. Wiley, 2009.

[RECM10] Q. Ren, D. A. Crolla, and A. Morris, "Effect of Transmission Design on Electric Vehicle (EV) Performance," *Journal of energy and power engineering*, vol. 4, no. 3, 2010.

[REGN03] J. Regnier, "Conception de systèmes hétérogènes en Génie Électrique par optimisation évolutionnaire multicritère," Institut national polytechnique de Toulouse, 2003.

[REIN14] V. Reinbold, "Méthodologie de dimensionne- ment d'un moteur électrique pour véhicules hybrides," Université de Grenoble, 2014.

[SAMA13] D. Samarkanov, "Techno-economic multi-objective optimization of induction machines," EC-Lille - USTL, 2013.

[SARE99] B. Sareni, "Méthodes d'optimisation multimodales associees a la modelisation numerique en electromagnetisme," Ecole centrale de Lyon, 1999.

[SARR12] B. Sarrazin, "Optimisation d'une chaîne de traction pour véhicule électrique," Université de Grenoble, 2012.

[SATT15] N. Satterley, *Economic cost of the health impact of air pollution in Europe*. WHO, 2015.

[SCWJ98] B. Y. M. Schonlau, W. J. Welch, and D. R. Jones, "Global versus local search in constrained optimization of computer models," *News developments and applications in experimental design*, vol. 34, pp. 11–25, 1998.

[SEBA01] F. Sebastiani, "Machine Learning in Automated Text Categorization," *ACM Computing Surveys*, vol. 34, no. 1, pp. 1–47, 2001.

[SEET06] C. J. Seeton, "Viscosity – temperature correlation for liquids," *Tribology letters*, vol. 22, no. 1, pp. 67–78, 2006.

[SGBW10] S. Schöps, H. De Gersem, A. Bartel, and B. U. Wuppertal, "A Cosimulation Framework for Multirate Time Integration of Field / Circuit Coupled Problems," *IEEE Transactions on magnetics*, vol. 46, no. 8, pp. 3233–3236, 2010.

[SOAS98] J. Sobieszczanski-Sobieski, J. S. Agte, and R. R. Sandusky, *Bi-Level Integrated System Synthesis*, NASA, 1998.

[SOLB00] I. Solberg, "fminconset." 2000. [Online]. Available: http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/96-fminconset [Accessed: 09-Dec-2015].

[TEDE10] J.-F. Tedesco, "La substitution des véhicules à carburant fossile par le véhicule électrique en agglomération." Université de Genève, 2010.

[THHA08] A. Thorpe and R. M. Harrison, "Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic : A review," *Science of the Total Environment*, vol. 400, no. 1, pp. 270–282, 2008.

[THSA09] C. Thanga Raj, S. P. Srivastava, and P. Agarwal, "Energy Efficient Control of Three-Phase Induction Motor - A Review," *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 61–70, 2009.

[TRAN09] T. V. Tran, "Problèmes Combinatoires et Modèles Multi-Niveaux pour la Conception Optimale des Machines Électriques," EC-Lille - USTL, 2009.

[TRDE12] P. Tran-Van and F. Delcorso, *Formation Li-ion*. Renault, 2012.

[VAPG10] A. Vagati, G. Pellegrino, and P. Guglielmi, "Comparison between SPM and IPM motor drives for EV application," in *International conference on electrical machines*, 2010.

[VENK01] P. Venkataraman, *Applied Optimization with MATLAB Programming*. John Wiley & Sons, 2001.

[VIVI02] S. Vivier, "Stratégies d'optimisation par la méthode des plans d'expériences et Application aux dispositifs électrotechniques modélisés par éléments finis," EC-Lille - USTL, 2002.

[VRAN68] J. E. Vrancik, *Prediction of windage power loss in alternators*, NASA, 1968.

[WU12] Z. Wu, “Conception optimale d’un entrainement electrique pour la chaine de traction d'un vehicule hybride electrique,” Université de Franche-Comté, 2012.

[ZXRL14] X. Zhang, J. Xie, R. Rao, and Y. Liang, “Policy Incentives for the Adoption of Electric Vehicles across Countries,” *Sustainability*, vol. 6, no. 11, pp. 8056–8078, 2014.

[ZZWZ13] B. Zhu, N. Zhang, P. Walker, W. Zhan, X. Zhou, and J. Ruan, “Two-Speed DCT Electric Powertrain Shifting Control and Rig Testing,” *Advances in Mechanical Engineering*, 2013.

Annexes

Annexe A

Détails du cycle WLTC

Le cycle WLTC est amené à être utilisé pour l'homologation des véhicules à l'avenir, en remplacement du cycle NEDC en Europe. Il existe différents cycles WLTC divisés en classes dépendantes de la puissance massique des véhicules (puissance du moteur / masse à vide en ordre de marche). La majorité des véhicules appartiennent à la classe 3 avec une puissance massique supérieure à 34W/kg.

Le cycle WLTC pour la classe 3 est divisé en 4 sections : basse, moyenne, haute et très haute vitesse.

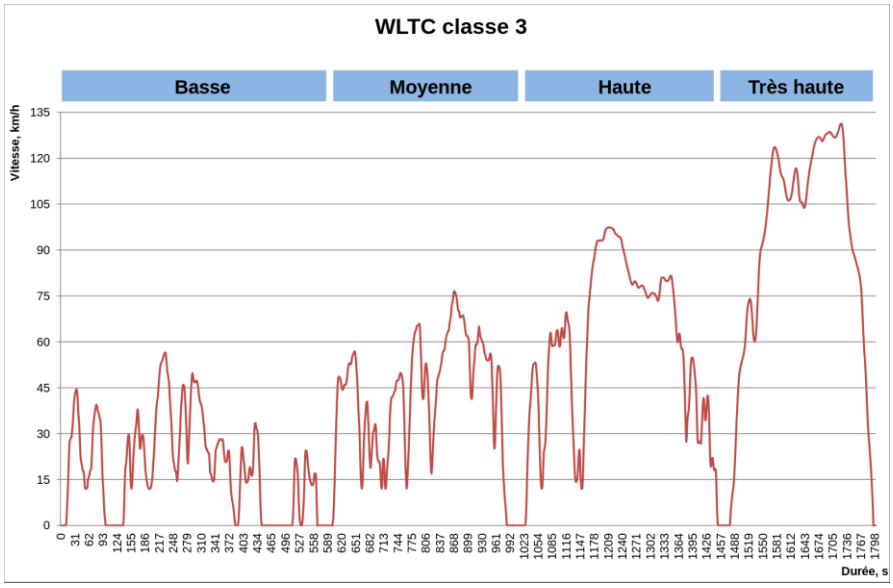


Figure 0.1 : cycle WLTC pour les véhicules de classe 3

Le détail des 4 sections est donné dans le Tableau 0.1.

Tableau 0.1 : Détails des 4 sections du cycle WLTC

	Basse	**Moyenne**	**Haute**	**Très haute**	**Total**
Durée (s)	589	433	455	323	1800
Durée des arrêts (s)	156	48	31	7	242
Distance (m)	3095	4756	7158	8254	23262
% des arrêts	26,5%	11,1%	6,8%	2,2%	13,4%
Vitesse maximale (km/h)	56,5	76,6	97,4	131,3	
Vitesse moyenne sans les arrêts (km/h)	25,7	44,5	60,8	94,0	53,8
Vitesse moyenne avec les arrêts (km/h)	18,9	39,5	56,6	92,0	46,5
Accélération minimale (m/s2)	-1,5	-1,5	-1,5	-1,2	
Accélération maximale (m/s2)	1,5	1,6	1,6	1,0	

Pour le cas d'application du Twiy, bridé à 80km/h, seules les sections « basse » et « moyenne » ont été utilisées.

Annexe B

Indice de sensibilité SRC

L'indice de sensibilité SRC_i est défini comme le rapport de la part de variance $V(X_i)$ due à une variable X_i sur la variance totale $V(Y)$ de la réponse étudiée Y :

$$SRC_i = \frac{\beta_i^2 V(X_i)}{V(Y)} \tag{0.1}$$

Cet indice suppose que le modèle étudié est linéaire :

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{p} \beta_i X_i$$
$$V(Y) = \sum_{i=1}^{p} \beta_i^2 V(X_i) \tag{0.2}$$

L'indice SRC représente donc le carré du coefficient de corrélation linéaire entre la réponse du modèle et ses variables d'entrée, il est compris entre 0 et 1. Bien que le modèle étudié ne soit pas linéaire, l'indice SRC permet d'avoir une première approximation de la sensibilité des variables du problème sur les sorties autonomie et cout. L'outil MATLAB® développé dans [JACQ06] a été utilisé pour avoir une représentation graphique des indices :

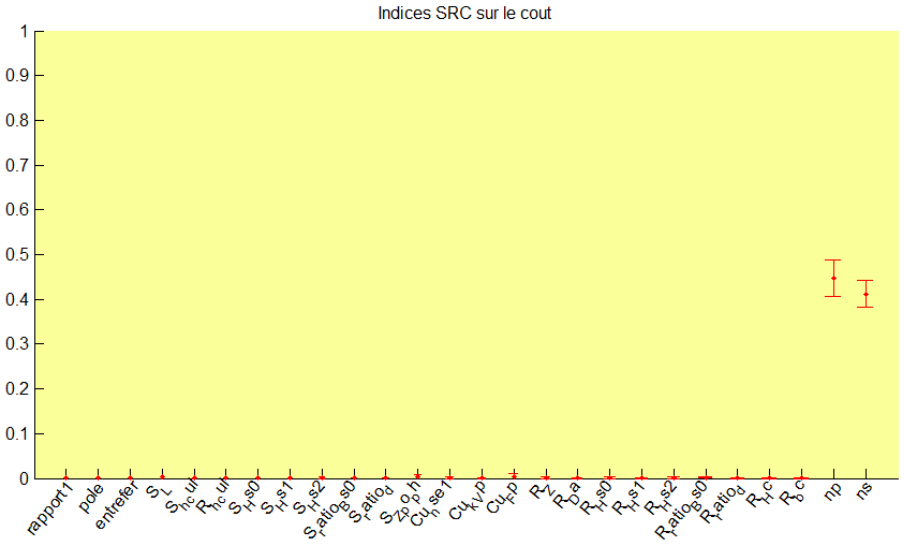


Figure 0.2 : Coefficient SRC sur le cout avec les variables batterie

Sur la Figure 0.2, sans surprise, les variables les plus influentes sur le cout sont les nombres de cellules de la batterie qui définissent sa taille. La relation entre le cout de la batterie et np/ns étant linéaire, les indices SRC sont élevés. Pour étudier l'influence des autres variables, np et ns ont été retirés du vecteur de variables analysées sur la Figure 0.3 :

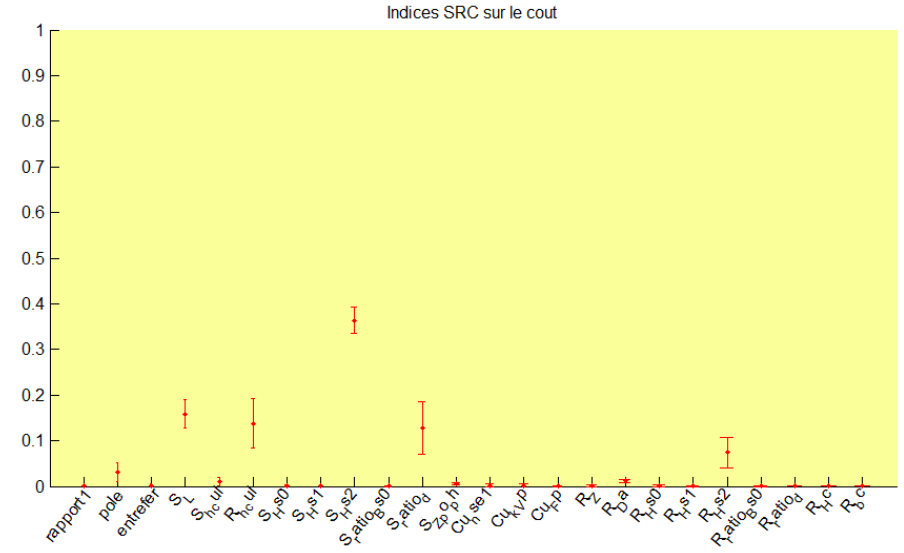


Figure 0.3 : Coefficient SRC sur le cout sans les variables batterie

La variable la plus influente sur le cout est la hauteur des encoches stator S_Hs2 qui définira le volume de cuivre utilisé dans la machine. Comme le cout du réducteur dépend de la puissance demandée, il est cohérent de ne pas avoir d'influence du rapport de réduction rapport1 sur le cout. La Figure 0.4 représente les indices SRC sur l'autonomie du véhicule.

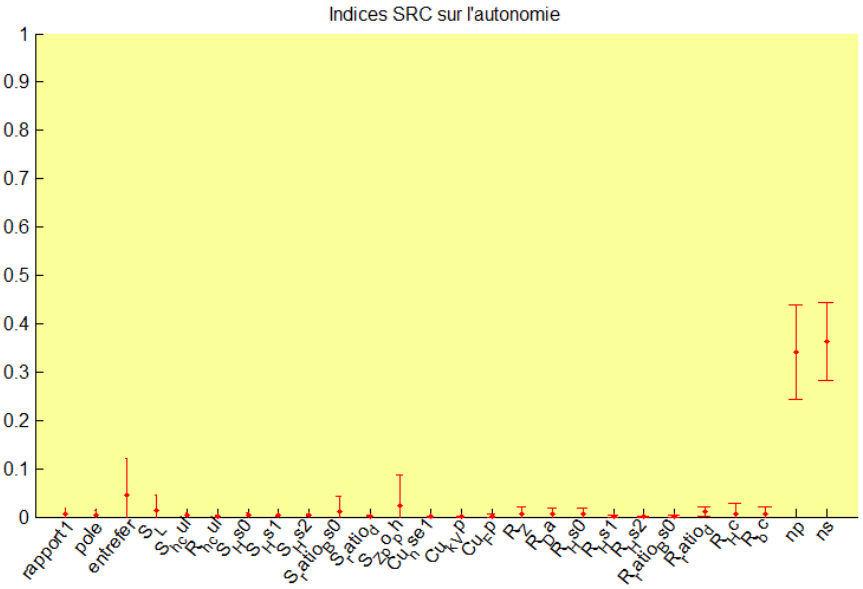


Figure 0.4 : Coefficient SRC sur l'autonomie avec les variables batterie

Comme pour le cout, la taille du pack de batterie a le plus d'influence sur l'autonomie. Pour étudier les autres variables, les indices SRC ont été calculés sans les variables batterie sur la Figure 0.5.

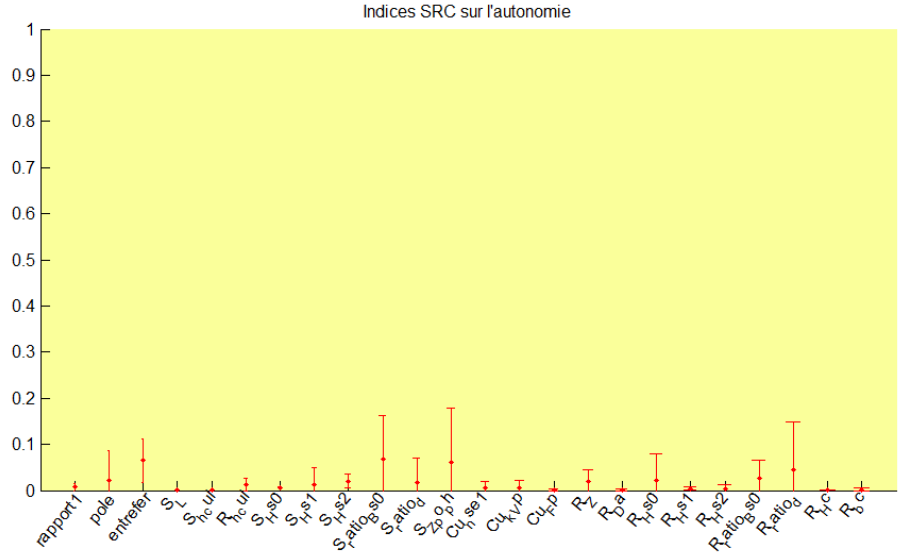


Figure 0.5 : Coefficient SRC sur l'autonomie sans les variables batterie

L'interprétation est moins aisée puisque tous les coefficients ont des indices faibles. Ceci peut s'expliquer par la non linéarité du modèle qui ne rend pas pertinent le calcul du SRC.

Annexe C

Banc d'essai

Pour pouvoir simuler avec un modèle le cycle que nous avons imposé au banc d'essai, il faut rajouter à ce cycle l'inertie du banc pour les phases d'accélération et de freinage. Cette inertie a été mesurée par un essai de laché : la machine est entrainée à 3500 tr/min puis le banc est coupé. La vitesse et le couple sont mesurés pendant la décélération naturelle du banc, nous avons obtenus la Figure 0.6.

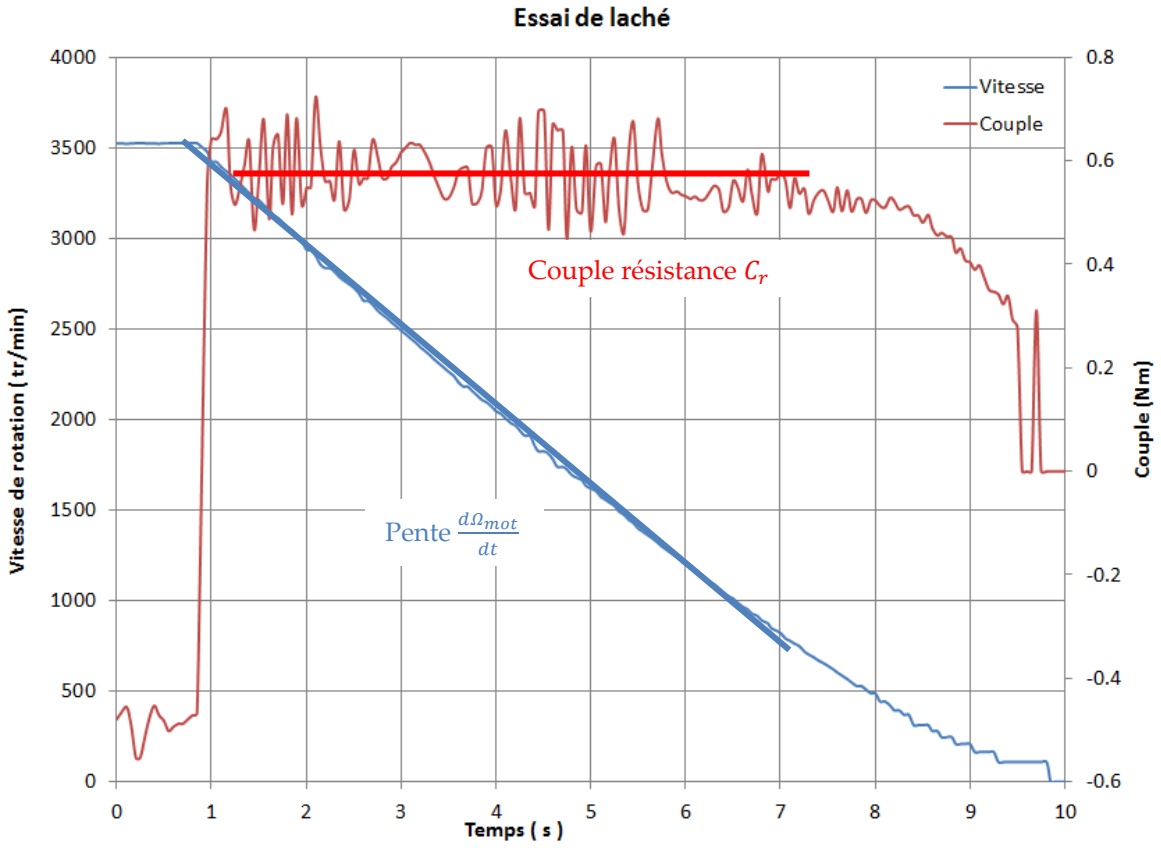


Figure 0.6 : Essai de lâché

La pente $\frac{d\Omega_{mot}}{dt}$ et le couple résistance C_r sont utilisés pour calculer l'inertie.

Par ailleurs les mesures des puissances mécaniques et électriques ont été effectuées pendant le cycle et sont présentées sur la Figure 0.7. La puissance AC correspond à la puissance absorbée par le moteur. La puissance DC correspond à la puissance absorbée par l'onduleur.

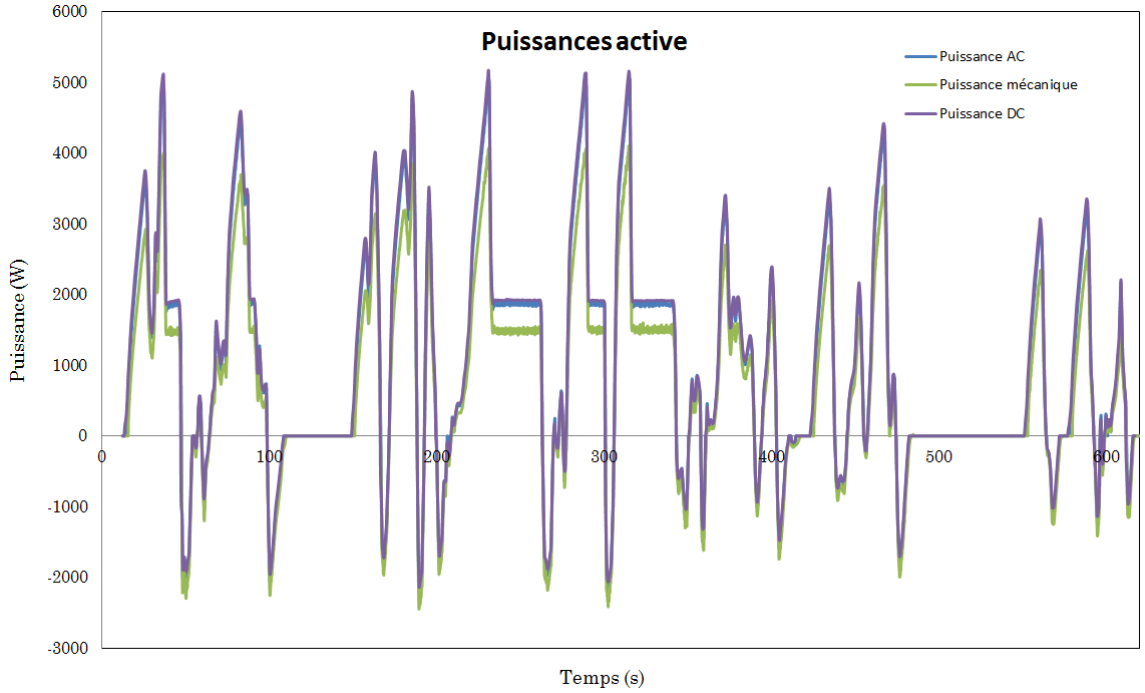


Figure 0.7 : Mesure des puissances actives

A partir de ces courbes de puissances, il est possible ce calculer le rendement du moteur (Figure 0.8) et de l'onduleur. Les courbes obtenues ont été comparées aux résultats de simulation.

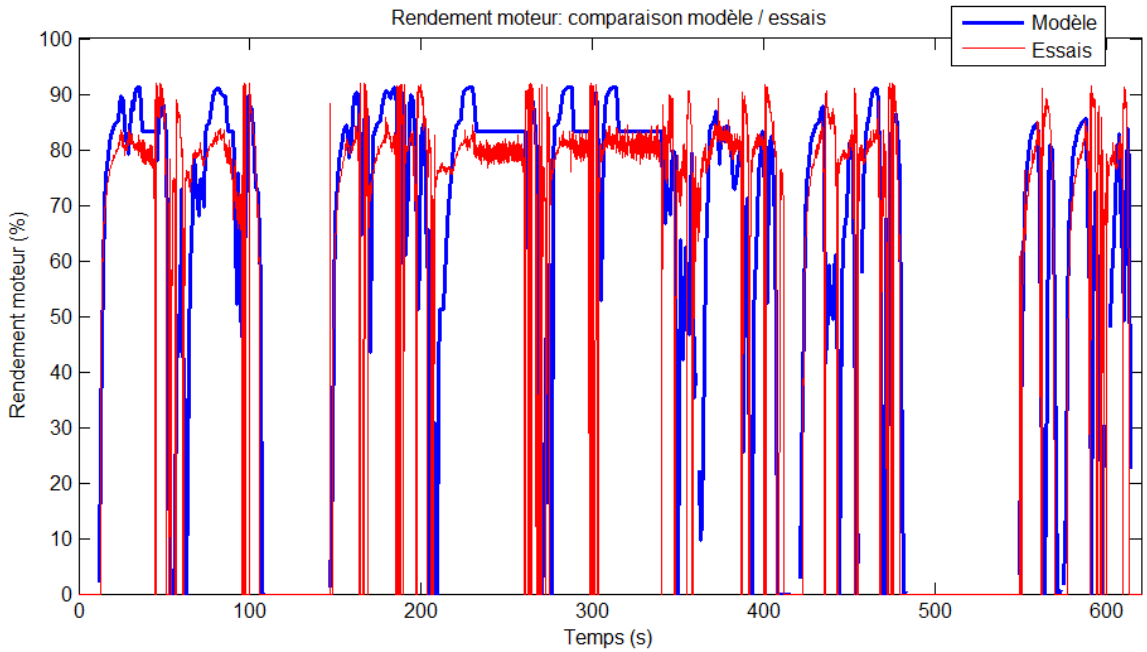


Figure 0.8 : Comparaison du rendement moteur entre modèle et essais

Modèle et essais suivent la même tendance, mais on peut noter des écarts importants sur certains points, principalement lors de pics de puissances parfois surévalués sur le banc d'essai à cause des réglages des correcteurs.

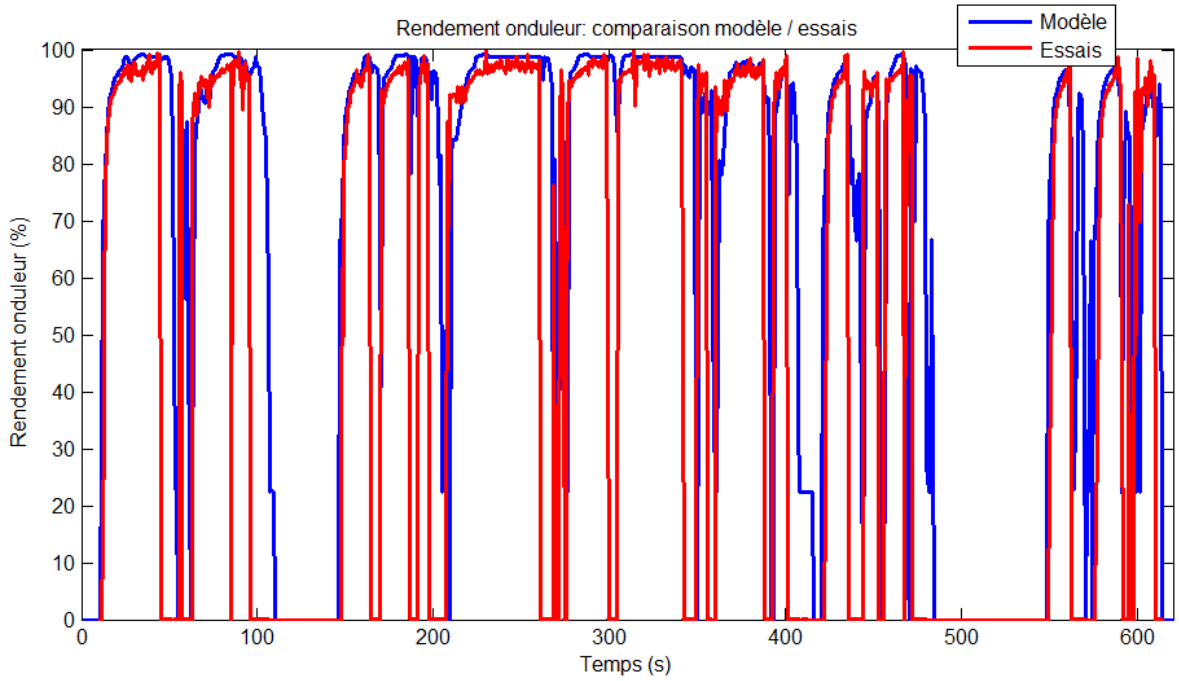


Figure 0.9 : Comparaison du rendement o entre modèle et essais

La comparaison entre essai et modèle est satisfaisante. On peut noter certaines portions ou les essais n'ont pas permis de calculer le rendement, notamment dans les phases de récupération où la mesure de la puissance DC n'est pas fiable.

Conception par optimisation d'une chaine de traction électrique et de son contrôle par modélisation multi-physique

Résumé

Les travaux de cette thèse portent sur la méthodologie de conception par optimisation d'une chaine de traction de véhicule électrique en phase amont du développement. Dans une première partie, nous avons abordé le contexte environnemental du transport afin de poser la problématique de la conception systémique d'une chaine de traction électrique composée d'une transmission, une machine électrique asynchrone, un onduleur et une batterie. Le cas test est celui du Renault Twizy. La seconde partie explore les possibilités de modélisation puis détaille les modèles analytiques qui ont été choisis pour chaque composant. L'assemblage de ces modèles permet une estimation de l'autonomie du véhicule, au travers du calcul des pertes des composants, et du cout de la chaine de traction. La troisième partie est consacrée aux méthodes et stratégies d'optimisation afin de pouvoir exploiter le modèle système en incluant le cycle de roulage, le contrôle de la machine électrique et les différentes physiques des composants, tout en conservant des temps de calcul raisonnable. Enfin, la dernière partie présente des résultats d'optimisation, en comparant différents jeux de variables et objectifs, soulignant l'importance d'une conception systémique. Des essais sur banc permettent de valider les hypothèses qui ont été posées.

Mots clefs: chaine de traction électrique, véhicule électrique, optimisation, système, modélisation, multi-physique, méthodologie, machine asynchrone, contrôle

---

Optimal design of an electric powertrain with its control through multi-physics modeling

Abstract

The works of this thesis concern the optimal design methodology of an electric vehicle powertrain, in early development phase. The first part of this report introduces the environmental context of transportation in order to assess the problem of system design of an electric powertrain which includes a transmission, an induction machine, an inverter and a battery. The selected study case is a Renault Twizy. The second part deals with modeling choices and details the analytic models of the components. Then these models are put together to get an estimate of the vehicle range, by calculating the components' losses and the powertrain cost. The third part is devoted to methods and optimization strategies with the objective to use the systemic model with driving cycles, electric machine control and the physics of each component, without increasing too much computing times. The final part presents results from optimal designs, by comparing several variables or objectives sets. Results show how significant the systemic design is. Experiments on a test bench allow validating the hypothesis that have been made.

Keywords: electric powertrain, electric vehicle, optimization, system, modeling, multi-physics, methodology, induction machine, control