Eco-conception d'une chaine de traction ferroviaire

Ramzi Ben Ayed

▶ **To cite this version:**

Ramzi Ben Ayed. Eco-conception d'une chaine de traction ferroviaire. Autre. Ecole Centrale de Lille, 2012. Français. NNT : 2012ECLI0009 . tel-00772267

HAL Id: tel-00772267

https://theses.hal.science/tel-00772267

Submitted on 10 Jan 2013

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 : 163

ECOLE CENTRALE DE LILLE

THESE

Présentée en vue

d'obtenir le grade de

DOCTEUR

en

Spécialité : Génie Electrique

par

Ramzi Ben Ayed

DOCTORAT DELIVRE PAR L'ECOLE CENTRALE DE LILLE

Titre de la thèse :

Eco-conception d'une chaine de traction ferroviaire

Soutenue le 25 juin 2012 devant le jury d'examen :

Président	Claude Marchand	Professeur, LGEP, SUPELEC, Paris
Rapporteur	Hamid Ben Ahmed	Maître de conférence HDR, ENS Cachan, Bruz
Rapporteur	Bruno Sareni	Maître de conférence HDR, ENSEEIHT, Toulouse
Examinateur	Abdelmounaïm Tounzi	Professeur, L2EP, Université de Lille 1
Directeur	Stéphane Brisset	Maître de conférence HDR, L2EP, Ecole Centrale de Lille
Co-directeur	Michel Hecquet	Professeur, L2EP, Ecole Centrale de Lille
Invité	Jean Bavard	Alstom Transport, Tarbes
Invité	Véronique Andriès	Alstom Transport, Petite Forêt

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

Remerciements

Ce travail a été réalisé à l'École Centrale de Lille, dans Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance de Lille (L2EP), au sein de l'équipe optimisation, en partenariat avec ALSTOM TRANSPORT qu'elle a cofinancé avec la région Nord-Pas-de-Calais.

Je suis extrêmement reconnaissant envers Monsieur Stéphane BRISSET, Maître de Conférences, HDR à l'École Centrale de Lille et directeur de ma thèse, pour le suivi et l'organisation de mon travail de thèse, et surtout pour sa confiance et de m'avoir recruter pour réaliser les travaux de cette thèse.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers Monsieur Michel Hecquet, Professeur à l'École Centrale de Lille, co-directeur de ma thèse et avec qui une collaboration scientifique fructueuse s'est vite établie sur la modélisation de certains composants.

J'aimerai également remercier Madame Véronique ANDRIES, Ecodesign Senior Expert – Network Leader à Alstom Transport Petite-Forêt, d'avoir facilité mes échanges avec les experts d'ALSTOM TRANSPORT et d'orienter mon travail vers une direction utile à notre partenaire. Je remercie aussi M. Jean Bavard, et Mr. Abdelillah El-Brighli, mes contacts à ALSTOM TRANSPORT Tarbes et à ALSTOM GRID à Petit-Quevilly d'avoir consacré du temps à répondre à mes questions et de m'avoir fourni les documents nécessaires au bon déroulement du stage.

Je tiens à remercier Monsieur Claude Marchand, Professeur SUPELEC à Cachan, pour avoir accepté d'examiner mon travail et de présider mon jury de thèse. Je le remercie de l'intérêt réel qu'il a manifesté sur le teneur de ce rapport.

J'adresse mes profonds remerciements à Monsieur Hamdi Ben Ahmed, Maître de Conférences, HDR, de l'ENS de Cachan antenne de Bretagne, et Monsieur Bruno Sareni, Maître de Conférences, HDR, de l'ENSEEIHT-INPT à Toulouse, aient accepté d'être rapporteurs de ce travail. Leurs remarques ont contribué à une meilleure valorisation du travail réalisé.

Je remercie sincèrement Monsieur Abdelmounaïm TOUNZI, Professeur de l'Université de Lille1, pour avoir accepté d'examiner ma mémoire de thèse.

C'est avec chaleur, joie et sincérité que je salue les membres du laboratoire, et plus particulièrement ceux de l'Ecole Centrale de Lille, avec lesquels j'ai passé ces dernières années.

J'aimerais bien mentionner mes chers amis Aymen AMMAR, Martin CANTEGREL, Alexandru Claudiu BERBECEA, Matias FAKAM, Jinlin Gong, Adrian Augustin POP, Dimitry SAMARKANOV, François GRUSON, Xavier MARGUERON et Guillaume PARENT et enfin mes deux collègues de bureau Nicolas BRACIKOWSKI, Mathieu ROSSI.

Je voudrais plus particulièrement exprimer ma reconnaissance envers Monsieur Frédéric Gillon, Maître de conférences HDR à l'École Centrale de Lille, Monsieur Xavier CIMETIERE, Ingénieur de recherche de L2EP, Monsieur Simon THOMY et Monsieur Christophe RYMEK, qui contribuent à la réussite de nos travaux de recherche et toujours dans la bonne humeur.

Il me sera impossible, enfin, de ne pas saluer mes parents et ma famille pour le soutien et les encouragements qu'ils n'ont cessé de me prodiguer, tout au long de ces années.

Tables des matières

Introduction générale 13

I. Chapitre 1, Partie 1 : Contexte et objectifs de la thèse 19

I.1. Introduction 21

I.2. Contexte de la thèse 21

I.2.1. Enjeux environnementaux 21

I.2.2. Solution proposée 22

I.3. Objectifs de la thèse 25

I.3.1. Eco-conception de la Chaine de Traction ferroviaire 26

I.3.2. Elaborer des modèles pour l'optimisation 27

I.3.3. Adaptation des algorithmes d'optimisation 27

I.3.4. Evolution des outils Alstom 27

I. Chapitre 1, Partie 2 : Etat de l''art de l'éco-conception 29

I.1. Introduction 31

I.2. Règlementations, normes et spécifications 32

I.2.1. Spécifications relatives à des exigences légales et réglementaires 33

I.2.2. Spécifications de priorité 1 34

I.2.3. Spécifications de priorité 2 34

I.3. Analyse de Cycle de Vie 35

I.3.1. Définition 35

I.3.2. Déroulement 35

I.3.3. Les méthodes de calcul d'impacts 38

I.3.4. Logiciels de gestion environnementale 40

I.3.5. Récapitulatif 41

I.4. Chaine de traction ferroviaire et sa modélisation 41

I.4.1. Modélisation 42

I.4.2. L'optimisation au service de l'éco-conception 45

I.5. Conclusion 48

II. Chapitre 2 : Analyse de Cycle de Vie du Tram Train 49

II.1. Introduction 51

II.2. Démarche ACV pour la chaine de traction du Tram Train 51

II.2.1. Définition du champ d'étude et des objectifs 51
II.2.2. Inventaire de cycle de vie 51
II.2.3. Conclusion sur l'ACV de la chaine de traction 67
II.3. Méthodes d'agrégation des impacts 68
II.4. Interprétation des résultats 70
II.5. Conclusion 74
III. Chapitre 3 : Besoin de l'éco-conception en optimisation 75
III.1. Introduction 77
III.2. Optimisation multidisciplinaires 78
III.2.1. Multidisciplinary feasibility 78
III.2.2. Individual Disciplinary Feasibility 79
III.2.3. All At Once 80
III.2.4. Comparaison des formulations MDO 81
III.3. Output Space Mapping à deux niveaux 89
III.3.1. Principe 90
III.3.2. Utilisation des formulations MDO 91
III.3.3. Comparaison des différentes démarches 92
III.3.4. Conclusion sur MDO et OSM 94
III.4. Output Space Mapping multi-niveau 94
III.4.1. Output Space Mapping à trois niveaux 94
III.4.2. Output Space Mapping n-niveaux 101
III.4.3. Application 103
III.5. Conclusion 104
IV. Chapitre 4 : Optimisation de l'ensemble transformateur de traction et PMCF 107
IV.1. Introduction 109
IV.2. Cahier des charges pour l'optimisation 109
IV.2.1. Critères 109
IV.2.2. Variables 110
IV.2.3. Contraintes 113
IV.3. Démarche 115
IV.4. Elaboration des modèles nécessaires 116

IV.4.1. Transformateur 116
IV.4.2. PMCF 137
IV.4.3. Interaction entre transformateur et PMCF 144
IV.5. Résultats des optimisations 154
IV.5.1. Réduction de masse du transformateur 154
IV.5.2. Optimisation rendement et masse de l'ensemble transformateur et PMCF 157
IV.6. Analyse de la sensibilité des résultats 161
IV.6.1. Influence du critère environnemental 161
IV.6.1. Changement d'un matériau 163
IV.7. Conclusion 170
Conclusion générale 173
Bibliographies 179

Table des figures

Figure I.1 : Schéma du développement durable : une approche génomique globale à la confluence de trois préoccupations, dites « les trois piliers du développement durable » [WIK-01]. 23
Figure I.2 : Exemple d'étiquette d'énergie d'une machine à laver 24
Figure I.3 : Production d'électricité d'origine renouvelable, hors hydraulique [RAP-03] 24
Figure I.4 : Cycle de vie d'un produit 25
Figure I.5 : Déroulement d'une ACV [ISO-14040] 36
Figure I.6 : Description sommaire d'une chaîne de traction ferroviaire [CONV-08] 42
Figure I.7 : exemple de simulation de la ChT du Tram Train sur CITHEL 44

Figure II.1 : ACV d'un kilogramme d'acier 52
Figure II.2 : Transformateur de traction du Tram Train 54
Figure II.3 : Coffre de traction d'un Tram Train 54
Figure II.4 : Moteur de traction du Tram Train 55
Figure II.5 : Interface graphique CITHEL® après une simulation de la chaine de traction sur le parcours choisi. 56
Figure II.6 : Répartition des impacts sur le cycle de vie du transformateur principal du Tram Train 60
Figure II.7 : Comparaison des effets environnementaux des trois huiles sur la phase de fabrication et sur le cycle de vie du transformateur (bleu : huile C, rouge : huile B et vert : l'huile A) 62
Figure II.8 : Répartition des pertes dans le coffre de traction 63
Figure II.9 : Répartition des impacts sur le cycle de vie des 6 coffres de traction du Tram Train 65
Figure II.10 : Répartition des impacts sur le cycle de vie du moteur de traction du Tram Train 66
Figure II.11 : Les catégories intermédiaires et les catégories de dommages de la méthode impact 2002+ 68
Figure II.12 : Comparaisons des différentes masses des principaux composants électriques de la chaine de traction 71
Figure II.13 : Comparaisons des différentes pertes électriques dans les principaux composants électriques de la chaine de traction 71
Figure II.14 : Comparaison des indices d'impact RMD des principaux composants électriques de la chaine de traction 72
Figure II.15: Comparaison des indices d'impact WE des principaux composants électriques de la chaine de traction 72
Figure II.16 : Comparaisons des autres indices d'impacts des principaux composants électriques de la chaine de traction 73
Figure II.17 : Répartition de l'indice d'impact WE pour les principaux composants de la chaine de traction du Tram Train en retirant la contribution des aimants du moteur 73

Figure III.1 : Structure du problème d'optimisation avec la formulation MDF 79
Figure III.2 : Structure du problème d'optimisation avec la formulation IDF 80
Figure III.3 : Structure du problème d'optimisation avec la formulation AAO 80
Figure III.4 : Variables d'optimisation du transformateur monophasé 81
Figure III.5 : modèle complet du transformateur monophasé avec un couplage fort entre les sous-modèles électromagnétique et thermique. 81
Figure III.6 : Structure du problème d'optimisation du transformateur avec la formulation MDF (couplage fort entre les sous-modèles électromagnétique et thermique) (MDF+LM) .. 82
Figure III.7 : Structure du problème d'optimisation du transformateur avec la formulation MDF (couplage faible entre les sous-modèles électromagnétique et thermique) (MDF+FP) 83
Figure III.8 : Structure du problème d'optimisation du transformateur monophasé avec la formulation IDF 83
Figure III.9 : Structure du problème d'optimisation du transformateur monophasé avec la formulation AAO 84
Figure III.10 : Modèles éléments finis 3D du transformateur et les variables d'optimisation (l'indice e indique les variables estimées par l'optimiseur) 86
Figure III.11 : (a) Carte magnétique, (b) Carte du flux de chaleur, (d) Carte de la température du transformateur 87
Figure III.12 : Structure du problème d'optimisation du transformateur avec formulation MDF+FP..... 87
Figure III.13 : Structure du problème d'optimisation du transformateur avec formulation IDF 88
Figure III.14 : OSM_IDF appliquée à l'optimisation du transformateur monophasé 92
Figure III.15 : Système de deux bobines supraconductrices pour stockage d'énergie..... 97
Figure III. 16 : Potentiel vecteur crée par un dipôle magnétique 98
Figure III.17 : Comparaison de l'induction dans la bobine extérieure du SMES entre un modèle analytique (à droite) utilisant 400 éléments et le modèle EF 2D (à gauche)..... 99
Figure III. 18 : classement des modèles selon leur précision et temps de calcul 102

Figure IV.1 : Circuit magnétique d'un transformateur colonne [DEB-06]..... 111
Figure IV.2 : Schéma de principe des bobinages pour un transformateur à 4 bobines [DEB-06] à droite une vue de dessus d'un bobinage..... 111
Figure IV.3 : Courant de court-circuit et ces composantes permanent et transitoire obtenus par le modèle..... 117
Figure IV.4 : modèle de simulation du court-circuit dans le transformateur de traction 118
Figure IV.5 : courant de court-circuit obtenu par simulation 118
Figure IV.6 : Schéma électrique équivalent du transformateur de traction 121
Figure IV.7 : Schéma thermique équivalent d'une agglomération de couche dans un enroulement..... 122
Figure IV.8 : section d'un canal d'huile dans le transformateur 124
Figure IV.9 : Modèle mécanique des fluides pour les canaux de refroidissement du transformateur..... 126

Figure IV.10 : Evolution de la durée de vie des isolants Nomex en fonction de leur température 127
Figure IV.11 : Force exercée par élément de circonférence sur la paroi de l'enroulement . 128
Figure IV.12 : Force électromagnétique exercées sur les enroulements du transformateur par élément de circonférence 128
Figure IV.13 : pression exercée sur les parois d'une chaudière cylindrique [PEL-88] 129
Figure IV.14 : Comparaison du modèle du Dowell aux mesures de la résistance pour une inductance de lissage 131
Figure IV.15 : Comparaison du modèle de Dowell aux mesures de l'inductance pour une inductance de lissage 132
Figure IV.16 : Vue de face du transformateur de traction et indication du sens de l'écoulement de l'huile 134
Figure IV.17 : Modèle multidisciplinaire du TT 136
Figure IV.18 : Secondaire d'un transformateur relié à un PMCF 137
Figure IV.19 : Commande des bras 1 est 2 du PMCF et allure de la tension entre les deux bras pour un rapport unitaire des amplitudes de la modulante et de la porteuse 138
Figure IV.20 : Diagramme vectoriel au secondaire du transformateur 138
Figure IV.21 : Commande des bras 1 est 2 du PMCF et allure de la tension entre les deux bras 139
Figure IV.22 : Caractéristiques courant tension d'un IGBT (a) et d'une diode de puissance (b) 140
Figure IV.23 : Modèle thermique statique d'un PMCF 144
Figure IV.24 : Modélisation du PMCF et d'un secondaire de transformateur sur PSIM® .. 145
Figure IV.25 : Allure de la tension et du courant au secondaire du transformateur 145
Figure IV.26 : Les signaux de commande implantés sur PSIM® et la tension obtenue aux bornes du PMCF 146
Figure IV.27 : Harmoniques de tension renvoyés sur le transformateur calculés par PSIM® 147
Figure IV.28 : Harmoniques de tension renvoyés sur le transformateur calculés par le modèle 147
Figure IV.29 : Schéma équivalent d'un secondaire du transformateur pour le fondamental (a) et les harmoniques (b) 147
Figure IV.30 : Spectre harmonique (PSIM®) du courant dans un secondaire du transformateur pour la fréquence de commutation $\boldsymbol{Fp0}$ *dans le PMCF.* 148
Figure IV.31 : Spectre harmonique (modèle) du courant dans un secondaire du transformateur la fréquence de commutation $\boldsymbol{Fp0}$ *dans le PMCF.* 148
Figure IV.32 : Modèle complet du transformateur + PMCF 149
Figure IV.33 : Evolution des pertes dans le transformateur de traction et dans les PMCF en fonction de la fréquence de commutation dans le PMCF 150
Figure IV.34 : Spectre harmonique de la tension dans un secondaire du transformateur pour une fréquence de commutation $Fp - max$ *dans le PMCF* 151
Figure IV.35 : Spectre harmonique du courant dans un secondaire du transformateur pour une fréquence de commutation de $F_{p\text{-}max}$ *dans le PMCF* 152

*Figure IV.36 : Evolution du coefficient **FR** en fonction de la fréquence des harmoniques*... 153
Figure IV.37 : Résultats de l'optimisation bi-objectif du TT actuel 158
Figure IV.38 : procédure d'optimisation avec le critère EI 162
Figure IV.39 : Superposition des fronts obtenus avec trois critères environnementaux 163
Figure IV.40 : Résultats de l'optimisation bi-objectif du TT en aluminium 164
Figure IV.41 : Evolution de l'épaisseur de peau pour l'aluminium et le cuivre en fonction de la fréquence 165
Figure IV.42 : Comparaison de quelques fronts pour des TT avec des secondaires en cuivre à des TT avec des secondaires en aluminium pour quelques fréquences de commutation..... 165
Figure IV.43 : Résultats de l'optimisation bi-objective du TT en cuivre 169
Figure IV.44 : Comparaison des trois fronts qui donnent les meilleures solutions pour les différents transformateurs 170

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Aspects et spécifications environnementaux (O) obligatoires, (P1) de priorité 1, et (P2) de priorité2 35

Tableau II.1 : Les pertes des différents composants du Tram Train calculées par CITHEL® sur le parcours choisi 58
Tableau II.2 : indices d'impacts du transformateur de traction 60
Tableau II.3 : un extrait de matériaux substitués dans le coffre de traction du Tram Train ... 63
Tableau II.4 : Les impacts calculés par EIME® pour un coffre de traction du Tram Train ... 64
Tableau II.5: Les impacts calculés par EIME pour un moteur de traction du Tram Train 67
Tableau II.6 : Les valeurs des coefficients d'impacts de la méthode impact 2002+ 69

Tableau III.1 : Comparaison du nombre moyen d'évaluations, du temps moyen de calcul et du taux de convergence des 1000 optimisations avec les trois formulations MDO 85
Tableau III.2 : Comparaison de l'optimisation directe et de OSM avec les formulations MDF et IDF 93
Tableau III.3 : Temps de simulation des différents modèles du transformateur 96
Tableau III.4 : Précision et temps de calcul du modèle élaboré en fonction du nombre d'éléments 100
Tableau III.5 : Nombre d'évaluations des différents modèles par les algorithmes OSM n-niveaux dans le cas du transformateur 100
Tableau III.6 : Nombre d'évaluations des différents modèles par les algorithmes OSM n-niveaux dans le cas du SMES 100
Tableau III.7 : Comparaison résultats OSM_3n et OSM classique pour le transformateur . 100
Tableau III.8 : Comparaison des résultats OSM_3n et OSM classique pour le SMES 101
Tableau III.9 : Comparaison des temps de calcul d'OSM_2n, OSM_3n, OSM_4n et OSM_5n 103
Tableau III.10 : Comparaison des temps de calcul d'OSM_2n, OSM_3n, OSM_4n et OSM_5n 104

Tableau IV.1 : Comparaison des quantités des matériaux calculées par le modèle et celles dans le transformateur actuel 131
Tableau IV.2 : Comparaison paramètres calculées par le modèle électromagnétiques à ceux mesurées sur transformateur existant 133
Tableau IV.3: Comparaison des températures calculées par le modèle et celles mesurées sur le transformateur existant 134
Tableau IV.4: Comparaison des impacts calculés par le modèle environnemental et ceux calculés par EIME®. 135
Tableau IV.5 : Comparaison du transformateur obtenu par optimisation mono-objectif avec le transformateur existant. 154
Tableau IV.6 : Comparaison des solutions optimales trouvées pour différentes fréquences de commutation 158

Tableau IV.7 : Comparaison du TT en aluminium avec un TT avec primaire en aluminium et secondaire en cuivre..... 166

Introduction générale

L'élaboration de normes et législations en faveur de l'environnement a été parmi plusieurs réactions des états et sociétés pour limiter les dégâts de la pollution. Ces normes visent principalement le secteur industriel puisqu'il est le principal acteur de la pollution. En effet, selon l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), il contribue à 25% des émissions totales des gaz à effets de serre, le secteur du transport, les logements, l'agriculture et la production de l'électricité qui contribuent respectivement à 24% , 20%, 18% et 7% de ces émissions. Avec ces normes en faveur de l'environnement, les pratiques industrielles ont évoluées vers une nouvelle méthode de conception de leurs produits.

La conception telle qu'elle est définie par Hatchuel dans [HAT-94] est un métier complexe qui consiste à déployer et associer dans un temps réduit, avec des ressources limitées, un ensemble de savoir-faire qui permettront d'aboutir à un compromis technique acceptable vis-à-vis de nombreuses contraintes et de critères de performance souvent contradictoires. Elle est en quelques mots un mélange du savoir-faire, savoir comprendre et savoir combiner. Une conception respectueuse de l'environnement nécessite de prendre en compte des contraintes additionnelles qui traduisent les normes environnementales et qui tendent à améliorer la performance environnementale du produit. La nouvelle méthode de conception nommée aussi éco-conception doit intégrer aujourd'hui les impacts environnementaux du produit pour les minimiser, notamment suivant des axes majeurs tels que les matières primaires, l'énergie, les substances, la pollution de l'air, la pollution des sols, la pollution de l'eau et les déchets. L'intégration de ces impacts et la prise en compte des contraintes dans le problème de conception définissent un nouveau problème de conception qui peut être exprimé comme un problème d'optimisation dont la solution optimale est à trouver par le concepteur.

L'optimalité est un concept flou difficilement formalisable, relatif et rarement unifié. Il suffit pour s'en convaincre d'examiner le choix d'un produit par le consommateur. Chaque consommateur choisit ce qu'il considère comme le meilleur et pourtant les choix opérés sont tous différents. Le fait est que, bien souvent, l'optimum est un arbitrage entre des objectifs multiples et conflictuels sous de nombreuses contraintes. Un problème d'optimisation bien posé est donc souvent multi-objectif sous contraintes [TRA-09]. La conception et l'optimisation des produits électromagnétiques impliquent l'élaboration des modèles multiphysiques et multidisciplinaires pour le dimensionnement du dispositif. Cependant, il y a différentes méthodes de modélisation des convertisseurs électromagnétiques. Le choix du type de modèle dépend des objectifs préfixés par le concepteur. La modification des caractéristiques (nombre de variables, nombre de contraintes et type de modèle) d'un problème d'optimisation remet en cause les algorithmes choisis pour sa résolution. Par conséquent, un algorithme choisi pour la conception n'est pas forcément celui qui convient à un problème d'éco-conception.

Comme d'autres industries, les préoccupations de l'industrie ferroviaire, et plus particulièrement celles de notre partenaire ALSTOM TRANSPORT, sont aujourd'hui focalisées sur l'éco-conception de ses produits. Ce fabricant de matériel ferroviaire a déjà

appliqué certaines normes environnementales dont la plus remarquable, en termes de matériaux, est celle liée à l'utilisation des substances interdites telles que l'arsenic, le cadmium, le plomb et d'autres citées dans [ALS-08]. Les composants ferroviaires présentent des particularités par rapport aux autres composants électromagnétiques. En effet, ces composants fonctionnent avec des fortes puissances (des centaines voire des milliers de kW), ils sont utilisés pour des applications embarquées (soumises à des contraintes de volume et de poids), consomment beaucoup de matériaux et de ressources dans la phase de fabrication et sont difficiles à modéliser puisqu'ils impliquent plusieurs disciplines interdépendantes. Enfin, ils doivent assurer un fonctionnement régulier sur une durée de vie importante (jusqu'à une trentaine d'année). Toutes ces particularités nous renseignent sur la complexité du problème d'éco-conception de ces produits, notamment les difficultés dans la modélisation et le dénombrement des flux entrant et sortant pour l'estimation des impacts environnementaux.

Les travaux présentés dans ce mémoire visent la chaine de traction d'un Tram Train et ses performances environnementales, plus précisément la consommation d'énergie et de matières primaires, la pollution de l'air du sol et de l'eau. Les objectifs de ceux-ci sont :

- D'une part, de mener une étude d'éco-conception « classique » de la chaine de traction en identifiant les aspects environnementaux significatifs des composants principaux et les pistes d'amélioration
- D'autre part d'évaluer la possibilité d'utiliser des techniques d'optimisation originales pour éco-concevoir d'une manière efficace.

La thèse contient quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons l'état de l'art de l'éco-conception qui présente une piste, parmi d'autres, de développement durable. Elle consiste à réduire les impacts environnementaux d'un produit en les intégrant dans sa phase de conception. Un problème d'éco-conception peut être formulé comme un problème d'optimisation qui nécessite des modèles et des outils spécifiques pour le résoudre. Quelques méthodes d'optimisation utiles à l'éco-conception sont présentées dans ce chapitre.

Le deuxième chapitre est consacré à l'analyse de cycle de vie de la chaine de traction du Tram Train. L'ACV permet de calculer les différents impacts environnementaux de la chaine et de comparer la performance environnementale de ses différents composants afin d'identifier les plus polluants. Elle permet également d'identifier les pistes d'amélioration de la performance environnementale de la chaine sur son cycle de vie.

Le troisième chapitre se concentre sur les démarches et méthodologies qui peuvent servir dans l'éco-conception. Nous présentons les formulations multidisciplinaires (MDO) qui permettent de gérer, au cours de l'optimisation, les interactions entre les différentes disciplines impliquées dans le modèle d'un convertisseur électromagnétique. Ces formulations sont testées sur le benchmark d'un transformateur. Les formulations les plus adaptées pour l'optimisation des composants ferroviaires sont mises en évidence. Les techniques d'optimisation multi-niveau de granularité, et plus particulièrement celle appelée

space-mapping, permettent d'accélérer fortement les optimisations réalisées avec des modèles dont le temps de simulation est grand (par exemple les modèles éléments finis 3D) par l'exploitation d'un modèle rapide de précision moindre. Nous avons proposé des évolutions de ces techniques pour réduire le temps de calcul par association avec des formulations multidisciplinaires et par l'utilisation de plusieurs modèles de qualités et de temps de calcul intermédiaires. Les algorithmes proposés sont testés sur les benchmarks du transformateur monophasé et celui du système de stockage de l'énergie magnétique (SMES).

Le quatrième chapitre est consacré à l'optimisation de l'ensemble transformateur de traction et des redresseurs reliés à ses secondaires. Dans un premier temps, un cahier des charges de l'optimisation a été élaboré avec des experts ALSTOM TRANSPORT. Dans un deuxième temps nous avons développé des modèles analytiques multiphysiques des deux composants et nous avons choisi la formulation multidisciplinaire la plus adaptée en se basant sur les conclusions du chapitre précédent. Finalement, les résultats de l'optimisation sont présentés et commentés à la fin de ce chapitre.

I. Chapitre 1, Partie 1 : Contexte et objectifs de la thèse

I.1. Introduction

Aujourd'hui, la protection de l'environnement est devenue un enjeu important pour les industries. En effet, les alarmes déclenchées par les différentes organisations mondiales de l'environnement et la présentation des menaces sérieuses pour la vie sur terre, ont poussé les états et les sociétés à presser les industries à revoir la conception, la fabrication et la composition de leurs produits afin d'obtenir des produits plus respectueux de l'environnement.

La conception de ces produits, appelée éco-conception, est une procédure classique de conception dans laquelle des nouvelles contraintes environnementales sont ajoutées et viennent encore réduire l'espace de faisabilité des solutions. Ces contraintes environnementales visent la réduction des impacts émis par le produit sur son cycle de vie. Des méthodes existent dans la littérature pour estimer ces impacts et les quantifier dont la plus connue est l'analyse du cycle de vie.

Ce chapitre est structuré comme suit, dans cette première partie du chapitre, le contexte de la thèse est présenté. Dans la deuxième partie les objectifs souhaités sont détaillés et finalement, certains travaux dans le domaine de l'éco-conception en génie électrique sont présentés dans l'état de l'art.

I.2. Contexte de la thèse

I.2.1. Enjeux environnementaux

Changement climatique

Le réchauffement climatique désigne la modification climatique de la terre caractérisée par une augmentation de la température moyenne des océans et de l'atmosphère, sur plusieurs années. Ce phénomène, est dû principalement à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ces gaz sont cités dans le protocole de Kyoto [KYO-11] et sont : dioxyde de carbone CO_2, méthane CH_4, les dioxydes d'azote NO_x, l'hexafluorure de soufre SF_6, les hydrofluorocarbures HFC et les perfluorocarbures PFC.

Le principal acteur de ce phénomène dangereux est l'homme. En effet, depuis les années 50 du vingtième siècle où la révolution de l'industrie mondiale a eu lieu, la concentration des gaz à effet de serre a augmenté de 35% selon les expertises du GIEC [GIE-07] (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère a amplifié le réchauffement du globe dont la température a atteint des records selon la NASA [NASA].

Les conséquences d'un réchauffement climatique qui ne serait pas enrayé peuvent être perçues ainsi : une montée du niveau des mers qui entraînerait inondations, migrations et réfugiés climatiques entre autres; une atteinte à la biodiversité et un impact sur les écosystèmes qui aurait des conséquences sur le monde animal et végétal; une diminution des ressources agricoles certaines et l'aggravation du sous-développement et de la crise

alimentaire; un accroissement des risques d'événements climatiques extrêmes (sécheresses, écarts de températures réduits, cyclones tropicaux, tornades, etc. ...), la liste n'est pas exhaustive [GIE-07].

Epuisement des ressources naturelles et croissance démographique

La planète a connu une croissance démographique exponentielle au XX^{lème} siècle, en passant de 1 milliard à plus de 6 milliards d'habitants et atteindra 9.2 milliards en 2050, selon les géographes [DUM-04]. Cette explosion démographique a engendré une accélération du mode de développement des pays, surtout riches, qui sont devenus très consommateur de ressources naturelles.

Les ressources minières telles que les sources d'énergie fossiles s'épuisent très rapidement. En effet, entre 1970 et 1995, 30% des richesses naturelles de la Terre ont disparues ainsi que 12% des forêts et 30% des écosystèmes marins [FUR-07]. La question qui se pose aujourd'hui, n'est plus de savoir combien nous serons, mais comment nous vivrons à 9.2 milliards d'habitants.

Ressources indispensables à la vie humaine, les réserves d'eau diminuent elles aussi de façon trop importante. Cela devient particulièrement inquiétant quand il est déjà connu que la moitié des êtres humains vivent dans une zone où les réserves d'eau douce diminuent. En France, régulièrement victimes de sécheresse, cinq départements ont un approvisionnement en eau préoccupant : le Vaucluse, les Bouches-du-Rhône, le Var, les Deux-Sèvres et la Charente-Maritime [ABC-12].

Santé humaine menacée

La contamination de l'environnement constitue l'un des déterminants essentiels de l'état de santé de l'être humain, en plus du comportement et de la génétique. En effet, parmi les 102 maladies répertoriées par l'organisation mondiale de la santé (OMS), 85 sont liées à la pollution environnementale [ORG-92].

L'aggravement de la situation actuelle a poussée différentes organisations et entreprises mondiales à penser à des remèdes pour sauver la vie humaine sur la planète.

I.2.2. Solution proposée

Face aux conséquences négatives de la pollution, un développement durable s'avère nécessaire. Il correspond à « la capacité à répondre aux besoins des générations présentes sans compromettre celle des générations futures à satisfaire les leurs » comme elle a été définie dans le rapport de Gro Harlem Brundtland intitulé "Our Common Future" et qui fut publié en 1987. Il s'agit d'éviter les dégradations de l'environnement irréversibles et l'épuisement des ressources non-renouvelables afin de préserver la reproduction de la biosphère. La figure I.1, résume le concept de développement durable comme l'adéquation entre la société, l'économie et l'environnement, ses trois piliers puisqu'elle représente les hommes.

Tous les secteurs d'activité sont concernés par le développement durable : agriculture, habitation et surtout l'industrie qui a subit des pressions des états et des sociétés particulièrement sévères pour réussir le développement durable. En effet, la société est le facteur le plus influençant sur ces trois piliers puisqu'elle représente les électeurs.

Pour répondre aux nouvelles exigences des sociétés et des états, le secteur industriel peux développer des axes d'amélioration visant un seul aspect environnemental (mono-critère), comme l'efficacité énergétique ou encore les énergies renouvelables mais peux aussi s'inscrire dans une démarche d'amélioration continue visant tous les aspects environnementaux significatifs par une approche d'éco-conception.

Figure I.1 : Schéma du développement durable : une approche génomique globale à la confluence de trois préoccupations, dites « les trois piliers du développement durable » [WIK-01].

Efficacité énergétique

L'efficacité énergétique vise principalement la réduction de la consommation énergétique des produits sans dégrader leur qualité de service. Ceci contribue certainement à la diminution des impacts environnementaux, des coûts économiques et sociaux liés à la production et à la consommation d'énergie tout en permettant d'augmenter la qualité de vie de tous les habitants de la planète et celle des générations futures. Elle regroupe aussi l'économie d'énergie et la maîtrise de l'énergie [TEC-01].

La directive européenne 92/75/CEE [DE-92] relative à l'efficacité énergétique est la plus connue. C'est elle qui a donné naissance à l'étiquette-énergie permettant d'évaluer l'efficacité énergétique des appareils électroménagers, des ampoules électriques et des voitures et qui va être généralisée à tout ce qui consomme de l'énergie. La figure I.2 montre un exemple d'étiquette énergie pour une machine à laver.

Energie renouvelable

L'exploitation des énergies renouvelables n'a pas cessé d'augmenter ces deux dernières décennies. Ces énergies appelées aussi énergie verte sont vues aujourd'hui comme une alternative de l'énergie fossile très polluante.

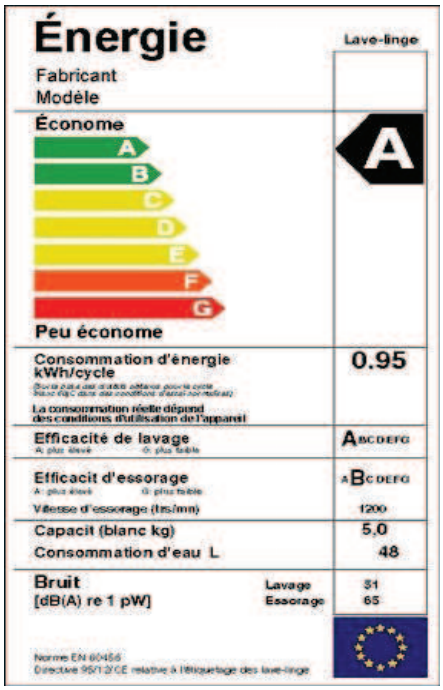


Figure I.2 : Exemple d'étiquette d'énergie d'une machine à laver

Les énergies renouvelables de toutes formes telles que biomasse, solaire, photovoltaïque, géothermique, hydraulique, contribuent aujourd'hui à la protection de l'environnement et à satisfaire une partie du besoin des populations en électricité. La figure I.3 montre la croissance de la production d'électricité d'origine renouvelable en France.

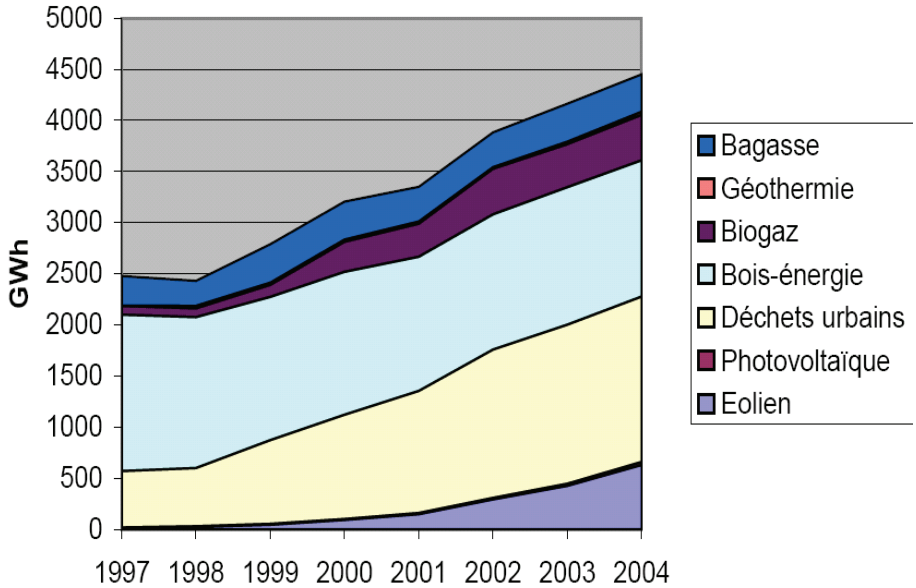


Figure I.3 : Production d'électricité d'origine renouvelable, hors hydraulique [RAP-03]

Eco-conception

L'éco-conception est la prise en compte et la réduction, dès la conception ou lors d'une re-conception de produits, d'un critère environnemental qui peut être évalué par plusieurs outils. Ces outils sont regroupés en deux catégories [TI-G6010]. La première catégorie englobe les

outils d'évaluation quantitative comme l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) qui est une démarche préventive qui se caractérise par une approche globale avec la prise en compte de tout le cycle de vie du produit (depuis l'extraction de matières premières jusqu'à son élimination en fin de vie) (cf. figure I.4) et de tous les critères environnementaux (consommations de matières premières, d'eau, énergie et ressources minières, rejets dans l'eau, l'air et le sol, production de déchets...). Quant à la deuxième catégorie, elle contient les outils qualitatifs comme le choix d'un indice écologique [CON-08] où on s'intéresse à la réduction d'un seul impact comme les émissions à effet de serre, par exemple.

Dans les grandes industries : chimiques, mécaniques, électriques, automobiles, ferroviaires entre-autres, l'éco-conception est un choix stratégique. En effet, elle ne permet pas uniquement la réduction des impacts environnementaux des produits fabriqués mais représente aussi une clé pour conquérir de nouveaux marchés nationaux et mondiaux. Dans cette thèse, nous nous intéressons à l'éco-conception dans le domaine ferroviaire.

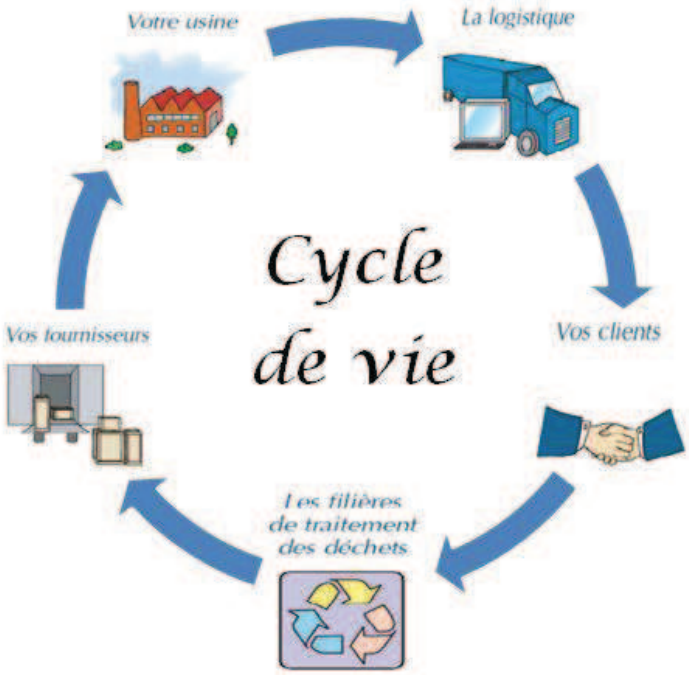


Figure I.4 : Cycle de vie d'un produit

I.3. Objectifs de la thèse

Les travaux menés dans cette thèse consistent à éco-concevoir les principaux composants électriques de la chaine de traction (ChT) d'un Train Tram fabriqué par ALSTOM TRANSPORT. Les tâches à réaliser pour atteindre ce but sont :

Réaliser une analyse de cycle de vie de la chaine de traction actuelle pour identifier les composants les plus impactants donc ceux à investiguer en priorité. L'analyse de cycle de vie va être réalisée avec un logiciel de gestion environnementale qui s'appelle EIME® qui permet

de calculer, de regrouper et classifier toutes les émissions générées sur le cycle de vie de la chaine sous onze indices d'impacts.

Identifier les manques du logiciel EIME® pour la modélisation environnementale de la chaine de traction du Tram Train et chercher des matériaux de substitutions dans la base de données du logiciel et les faire valider par un expert matériaux d'ALSTOM pour combler les manques de ce logiciel.

Fixer un cahier des charges pour l'optimisation des composants à éco-concevoir, dans laquelle les objectifs, les variables d'optimisation, leurs limites de variation et les contraintes de bon fonctionnement sont fixés en concertation avec des experts ALSTOM.

Elaborer et valider les modèles nécessaires pour les composants le plus impactants identifiés dans l'étape précédente, pour réduire leurs impacts en utilisant des algorithmes d'optimisation. En effet, un modèle multiphysique permet de calculer les pertes du composant sur sa phase d'utilisation et de déterminer les quantités de matériaux utilisées et à traiter, respectivement dans la phase de fabrication et de fin de vie. Un modèle environnemental permet de calculer les différents impacts à partir des informations (masse des matériaux et pertes) fournies par les autres modèles. Le problème d'optimisation s'avère difficile avec 12 objectifs (un objectif économique et onze impacts environnementaux). Pour simplifier le problème d'optimisation, on peut trouver une méthode d'agrégation d'impacts environnementaux adéquate pour regrouper tous les indices d'impacts en un seul indice environnemental.

Choisir parmi les outils (algorithmes et formulations) d'optimisation présents dans la littérature ceux qui répondent le mieux à nos besoins pour l'éco-conception. Si certains algorithmes ne répondent pas pleinement à nos attentes, il faut les adapter, les combiner ou s'en inspirer pour en développer d'autres.

Lancer l'optimisation et obtenir des résultats sous forme de compromis entre les objectifs économiques et écologiques. Le choix de la solution la plus pertinente qui répond aux besoins du marché ou des clients est fait *a posteriori* par un expert.

Intégrer la démarche environnementale développée dans cette thèse dans les outils d'ALSTOM TRANSPORT, ce qui permettra d'avoir une idée approximative sur la performance environnementale de n'importe quelle chaine simulée par ces outils.

Les quatre tâches principales sont détaillées ci-dessous.

I.3.1. Eco-conception de la Chaine de Traction ferroviaire

Les travaux réalisés dans cette thèse visent l'éco-conception de la chaine de traction du Tram Train pour avoir un meilleur respect de l'environnement avec un coût minimal. Une analyse de cycle de vie permet d'identifier, les aspects environnementaux significatifs (les paramètres qui génèrent le plus d'impacts) d'un produit, les composants les plus nuisibles à l'environnement dans la chaine de traction et permet également de nous orienter vers des

pistes d'amélioration. Parmi ces pistes, nous avons investigué celles qui exploitent les outils d'optimisation.

I.3.2. Elaborer des modèles pour l'optimisation

Pour quantifier les pertes de chaque composant et les quantités de matériaux utilisées et pour vérifier que le nouveau composant éco-conçu respecte les conditions de fonctionnement précisées dans le cahier des charges, des modèles multiphysiques sont élaborés, tels que des modèles thermique, électrique, magnétique, mécanique de fluide et géométrique.

Les modèles électrique et magnétique permettent de calculer les différentes pertes électriques du composant pour un point de fonctionnement donné. Le modèle thermique permet de calculer les températures dans certains matériaux du composant. Souvent, les températures calculées sont contraintes. Le modèle mécanique des fluides permet de calculer les pertes de charge et la vitesse du fluide utilisé pour le refroidissement du composant. Tous ces modèles interagissent entre eux pour le calcul des différentes grandeurs. En effet, les températures sont directement reliées aux pertes électriques et aux résistances thermiques des matériaux qui dépendent elles-mêmes du fluide utilisés pour le refroidissement et de sa vitesse d'écoulement qui influe directement sur les coefficients de convection.

I.3.3. Adaptation des algorithmes d'optimisation

Les modèles multiphysiques des composants ferroviaires sont particulièrement complexes de par le nombre de sous-modèles qui les constituent, des problèmes d'interactions entre sous-modèles et de leurs tailles. Ceci fait de l'exploitation de ces modèles dans l'optimisation une tâche compliquée et surtout très lourde en temps de calcul.

Pour répondre aux attentes de notre partenaire qui souhaite des outils d'aide à la décision rapide, certains algorithmes devront être adaptés pour accélérer l'optimisation sans modifier la précision des solutions trouvées. Pour vérifier la fiabilité des algorithmes nous les testeront sur des benchmarks trouvés dans la littérature.

I.3.4. Evolution des outils Alstom

L'outil actuel d'ALSTOM pour la modélisation des chaines de traction sur un profil de mission permet de calculer la consommation énergétique de la chaine, l'énergie récupérée lors des freinages, l'énergie perdue dans certains composants et d'autres paramètres électriques, thermiques et cinématiques. Pour l'instant, ce logiciel ne permet pas de faire des optimisations ni de donner une visibilité sur la performance environnementale de la chaine étudiée. Un des objectifs de cette thèse est de faire évoluer cet outil en lui intégrant une démarche qui permettrait de calculer les impacts environnementaux d'une chaine de traction sur son cycle de vie. Un autre objectif de cette thèse est de proposer des pistes permettant d'exploiter ce logiciel dans des optimisations pour mieux répondre au cahier des charges fixés avec les experts d'ALSTOM.

Dans ce cahier des charges figurera les deux critères d'optimisation (critère économique et environnemental), les contraintes et les variables de l'optimisation dont certaines présentent un caractère discret. Ceci signifie que ce cahier de charge va orienter les choix des algorithmes pour l'optimisation.

I. Chapitre 1, Partie 2 : Etat de l'art de l'éco-conception

I.1. Introduction

L'éco-conception a envahi tous les domaines du génie civil, génie mécanique, génie matériaux, génie électrique, ferroviaire, etc.

Dans le domaine du génie des matériaux, un nouveau terme a apparu « éco-matériau » il consiste à exploiter des matériaux non-polluant et/ou renouvelables pour préserver l'environnement. Plusieurs études dans ce domaine ont été faite. Dans [JOL-05], une étude environnementale est menée pour substituer un bloc avant en acier d'une voiture par un autre à base de composite, aluminium brut et aluminium recyclé. Les quatre solutions sont étudiées est le bloc le plus écologique, celui en aluminium recyclé, a été choisi.

Dans le domaine du génie électrique, des travaux sur l'éco-conception ont été menés sur la stratégie de conception et planification des tâches chez la société Philips [JAN_00]. Des travaux sont également menés au sein du L2EP à l'Ecole Centrale de Lille sur l'éco-conception d'un transformateur monophasé [TRA-09] et sur quelques convertisseurs électromagnétiques [DEB-09] au laboratoire SATIE à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan. Dans [DEB-09], des exemples d'éco-conception de trois convertisseurs ont été proposées : un transformateur monophasé à alimentation fixe, un moteur asynchrone monophasé et une machine asynchrone triphasé. Le critère environnemental choisi est l'énergie consommée sur cycle de vie alors que le critère économique a été représenté par la masse du composant. Les algorithmes évolutionnaires ont été choisis dans [DEB-09] pour trouver l'ensemble des compromis entre ces deux critères contradictoires. D'autres travaux d'éco-conception sont aussi en cours à Béthune [BOU-12]. Ces travaux sont focalisés principalement sur l'éco-conception des motorisations électriques et ils consistent à la substitution des matériaux utilisés dans les isolants des moteurs électriques par d'autres matériaux plus écologiques.

Dans le domaine ferroviaire, plusieurs études sur l'impact environnemental des produits ont déjà été menées. Elles regroupent par exemple l'étude du métro de Vienne [SHO-07] appelé projet Green Line, l'étude sur un train de la compagnie SESTO, et l'éco-conception d'un transformateur auxiliaire de traction [CON-08] au laboratoire du L2EP en partenariat avec ALSTOM TRANSPORT.

Le projet Green Line est une analyse du cycle de vie du métro de Vienne menée par l'université technologique de Vienne en partenariat avec SIEMENS TRANSPORTATION SYSTEM. Bien que ce type de métro soit alimenté en continu et ne comporte donc pas de transformateur de traction, cette étude reste intéressante dans le cadre de mon travail car elle s'intéresse au matériel ferroviaire dont l'une des particularités est d'avoir une longue durée de vie (plus de 30 ans), un grand nombre de matériaux et sous-composants et une puissance de fonctionnement importante. L'un des résultats de cette étude montre en particulier que la phase d'utilisation est prépondérante lorsqu'il s'agit d'impacts environnementaux. Il est possible de conjecturer que cette durée de vie particulièrement longue qui rend la phase d'utilisation plus importante que les autres [RBA-10].

L'étude menée par la société SESTO porte sur l'impact économique. Le but était de minimiser la masse du transformateur de traction dans un train de 400 tonnes. Les résultats

montrent que pour un train aussi lourd, réduire la masse du transformateur entraine une dégradation du rendement de la chaine qui pénalise les résultats du train d'un point de vue environnemental. La masse du transformateur et son rendement étant antagonistes, il est plus intéressant de concevoir un transformateur ayant la masse la plus élevée acceptée par le train, de manière à privilégier un meilleur rendement.

Le travail fait dans [CON-08] consiste à trouver un ensemble de compromis optimaux entre la masse d'un transformateur de traction et son indicateur d'impact « *Global Warming* » (GW) (quantité de CO_2 en gramme équivalent dégagée par le transformateur sur son cycle de vie). Le choix d'une solution est fait *a posteriori* par un expert éco-conception.

Aujourd'hui dans le ferroviaire, l'éco-conception de certains composants et/ou sous-composants n'est plus un choix mais une obligation parce que, d'une part les exigences de clients comme la Chine et l'Allemagne sont orientées vers des produits verts. D'autre part, l'apparition de certaines normes et spécifications, comme celle sur l'efficacité énergétique, viennent fortifier le choix stratégique de l'éco-conception.

I.2. Règlementations, normes et spécifications

Pour faire adopter une démarche environnementale et d'éco-conception dans une entreprise, la famille des normes ISO 14000 [ISO-14000] et des directives européennes ont été légiférées. On peut citer les directives RoHS (*Restrictive of the use of Hazardous Substances*) limitant l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques, la directive WEEE (*Waste of Electrical and Electronic Equipments*) réglementant aussi bien la conception des produits que la collecte et les modes de traitement des déchets électriques, la directive EuP (Energy using Product), fixant des exigences en matière d'éco-conception applicables aux produits consommateurs d'énergie et en dernier lieu la règlementation REACH (*Registration Evaluation and Autorisation of Chemicals*) essayant de combler le déficit de connaissances des risques environnementaux et sanitaires qui peuvent résulter de la production et de l'utilisation des substances chimiques.

Dans le domaine ferroviaire, les organismes internationaux comme l'UIC (Union International des Chemins de fer) et européens comme l'UNIFE (*Union of the European Railway Industries*) imposent des spécifications environnementales strictes lors de l'achat de Tram Train neuf. A ces spécifications, on peut également ajouter les règles internes fixées par certaines entreprises, comme c'est le cas à ALSTOM TRANSPORT.

Les spécifications environnementales comme celles présentées dans [UIC-345] sont créés pour évaluer les performances des nouveaux matériels roulants. Elles peuvent être considérées comme des règles pour évaluer les performances environnementales d'un Tram Train neuf. En effet, une chaine de traction qui respecte les différentes spécifications présentes dans l'UIC-345 [UIC-345] garantie aux clients un degré de satisfaction élevé.

Les spécifications environnementales sont de deux types [UIC-345]:

- Des spécifications juridiquement obligatoires : ce sont les spécifications les plus importantes et exigent des performances environnementales à règlementer légalement. Un produit qui ne respecte pas ces spécifications ne peut pas être mis sur le marché.
- Des spécifications volontaires : ces spécifications ont un degré d'importance moindre que celui des spécifications mentionnées précédemment et ont des priorités différentes. On note par priorité 1 les spécifications volontaires les plus importantes et par priorité 2 les spécifications les moins importantes.

Les spécifications volontaires ne sont pas gouvernées par des législations. Ces spécifications peuvent être exigées dans une commande selon la stratégie environnementale du demandeur.

L'investissement pour règlementer les spécifications volontaires est primordial pour les industries. En effet, être à jour dans ce type de spécifications réduit les dépenses et les efforts consacrés pour répondre à d'autres spécifications qui viendront à l'avenir et qui sont souvent juridiquement plus strictes.

I.2.1. Spécifications relatives à des exigences légales et réglementaires

Des spécifications obligatoires règlementent les aspects potentiels dans le domaine ferroviaire qui sont l'émission de bruit lors du passage du matériel roulant, l'émission de bruit à l'arrêt, l'émission de bruit au démarrage, l'émission de particules et de fluides, l'émission de champ électromagnétique et les matériaux et assemblages.

Pour l'émission de bruit, la nouvelle directive d'interopérabilité 2008/57/EC remplace les deux directives existantes qui concernent les trains de grande vitesse (96/48/EC) et classiques (2001/16/EC) par les deux amendements (2004/50/EC et 2007/32/EC).

L'émission de particules et de fluides est aussi un aspect environnemental potentiel au vu de ses conséquences nuisibles aux personnes et également à l'environnement. Cet aspect est gouverné par la directive européenne 97/68/EC.

Les champs électromagnétiques (EMF) rayonnés par un matériel fonctionnant avec l'énergie électrique menacent la santé publique. En effet, l'exposition à un tel champ cause des problèmes de santé récemment découverts. Cet aspect est gouverné par la directive EU 2004/40/EC et ses valeurs limites, dépendant de la fréquence de fonctionnement, sont fixées par la recommandation du conseil de l'UE 1999/519/EC.

Pour l'industrie ferroviaire qui consomme beaucoup de ressources naturelles, l'aspect matériaux et assemblages doit être maitrisé dès la phase de conception et ne doit pas présenter de risque ni pour la santé des professionnels intervenant lors de fabrication et de l'entretien, ni pour les usagers. Plusieurs spécifications gouvernent cet aspect : la directive EU 67/548/EEC qui classifie les substances dangereuses, la directive EU 76/769/EEC et EU 1999/45/EC sur la commercialisation et l'utilisation de certaines substances dangereuses et leurs préparations, le catalogue des déchets européens (EWC-EU *Commission decision* 2000/532/EC), et la

directive 91/157/EEC sur les batteries. La sélection des matériaux et assemblages doit contribuer aussi à l'amélioration du taux de recyclage des véhicules et, par conséquent, à la minimisation des déchets.

I.2.2. Spécifications de priorité 1

Les spécifications de priorité 1 sont [UIC-345] :

- ✓ Consommation d'énergie de traction
- ✓ Consommation d'énergie à bord
- ✓ Régénération d'énergie
- ✓ Emission des plaquettes de frein

I.2.3. Spécifications de priorité 2

Les spécifications de priorité 2 sont [UIC-345] :

- ✓ Masse
- ✓ Gestion d'énergie des véhicules en gare
- ✓ Equipement de mesure d'énergie
- ✓ Matériaux réutilisable
- ✓ Taux de recyclabilité
- ✓ Déversements et fuites

Le tableau I.1 récapitule les aspects environnementaux, les spécifications qui les gouvernent et les valeurs limites mentionnées dans les directives.

La connaissance des différentes spécifications ferroviaires et leurs priorités est obligatoire avant de se lancer dans une étude environnementale car ces spécifications imposent les contraintes et les objectifs de l'étude qui, sans quoi, ne peut aboutir.

Généralement une étude environnementale vise l'évaluation ou l'amélioration de la performance d'un produit qui est liée directement à ses impacts au cours de son cycle de vie. L'évaluation peut se faire efficacement avec un outil qui s'appelle analyse de cycle de vie.

Tableau I.1 : Aspects et spécifications environnementaux (O) obligatoires, (P1) de priorité 1, et (P2) de priorité2

Aspects	Spécifications	Contraintes
Emission de bruit	Bruit lors du passage de l'appareil (O)	82 dBA
	Bruit au démarrage (O)	75 dBA
	Bruit à l'arrêt(O)	82 dBA
Emission des particules et des fluides	Emission de particules et de fluides (O)	Selon la puissance
	Déversements et fuites (P2)	Minimiser
	Emission des plaquettes de frein (P2)	Minimiser
Consommation d'énergie	Consommation d'énergie de traction (P1)	Minimiser
	Consommation d'énergie à bord (P1)	Minimiser
	Régénération d'énergie (P1)	Maximiser
	Masse (P2)	Minimiser
	Gestion d'énergie des véhicules stationnés (P2)	-
	Equipements de mesure d'énergie (P2)	-
Matériaux et assemblage	Restriction / interdiction de matériaux (O)	
	Déchets dangereux (P1)	Minimiser
	Taux de recyclabilité (P2)	Maximiser
autres	Emission du champ électromagnétique (O)	Densité de courant < 2 mA/mm²

I.3. Analyse de Cycle de Vie

I.3.1. Définition

L'analyse de cycle de vie (ACV) est un outil d'évaluation environnementale multicritère qui prend en compte le cycle de vie complet du produit. Il permet de s'assurer que les aspects environnementaux sont identifiés et permet ainsi la réduction des impacts sans transfert de pollution vers une autre phase du cycle de vie du produit. Il s'agit d'un outil d'aide à la décision dans le choix des réductions des impacts environnementaux des produits [AFN-08].

I.3.2. Déroulement

La démarche d'une ACV contient quatre étapes, comme il est montré dans la figure I.5. Ces étapes qui sont la définition du champ d'étude et des objectifs, l'inventaire du cycle de

vie, l'évaluation d'impacts et l'interprétation des résultats [ISO-14040] ne sont pas figés par un ordre chronologique, c.-à-d. qu'à n'importe quel stade de l'étude on peut basculer d'une étape à une autre pour mieux répondre aux objectifs.

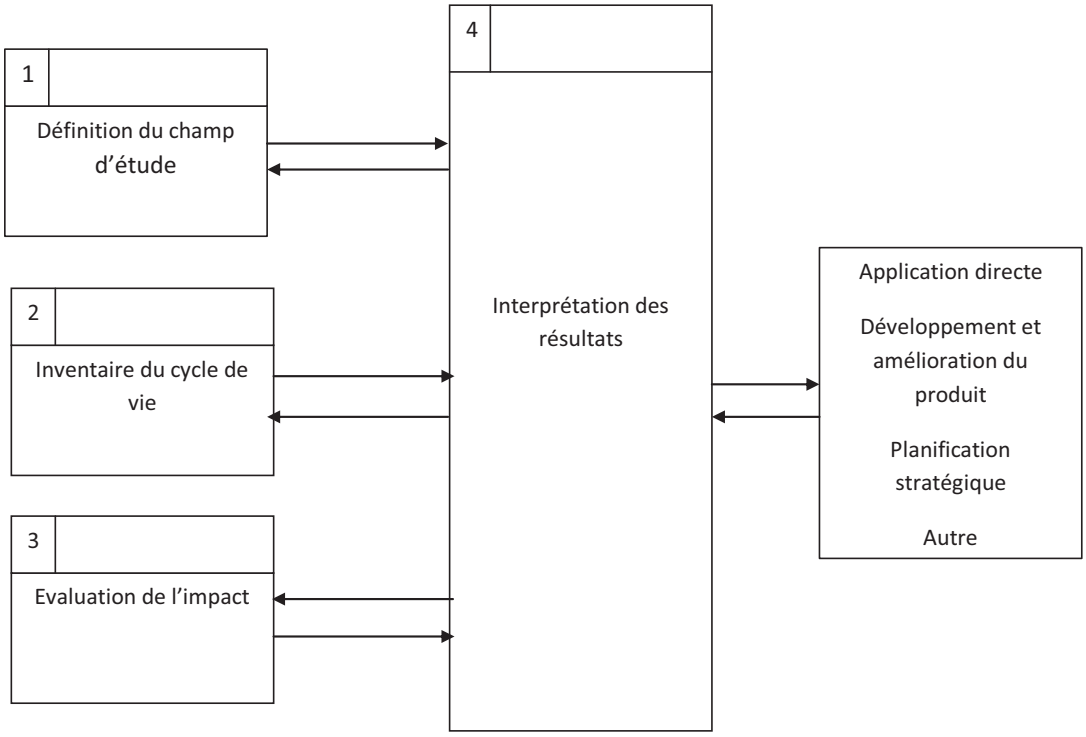


Figure I.5 : Déroulement d'une ACV [ISO-14040]

Définition des objectifs et du champ d'étude

Il s'agit de délimiter le champ d'étude à un produit ou composant et de fixer les objectifs à atteindre à la fin de cette analyse, par exemple déterminer les aspects environnementaux significatifs ou comparer plusieurs solutions techniques.

Inventaire du cycle de vie

L'inventaire proprement dit est un bilan consommation-émissions du produit défini dans l'étape précédente (la définition des objectifs et du champ de l'étude). L'analyse de l'inventaire du cycle de vie (ICV) porte alors sur les modes de calcul et de collecte des données. Selon la norme ISO 14044 [ISO-14044], les étapes opérationnelles comprennent :

— recueil des données
— calcul des données

- Recueil des données : dans cette étape toutes les informations (mesurées, calculées ou estimées) sur chaque composant dans les différentes phase de sa vie (construction, utilisation, fin de vie) sont utilisées pour quantifier les intrants et les extrants.
- Calcul des données : il s'agit de calculer tous les intrants et les extrants d'un composant. Lors de la détermination des flux élémentaires associés à la production, il convient d'utiliser, aussi souvent que possible, la composition réelle de production afin qu'elle reflète les différents types de ressources consommés.

L'inventaire permet de déterminer les quantités de matières, d'énergies utilisées, les émissions dans l'eau, l'air et le sol. Ces résultats doivent être interprétés et reliés avec leurs impacts sur l'environnement. C'est l'étape de l'analyse de l'impact.

Analyse de l'impact

- *Principe de l'analyse*

Les différentes émissions relevées de l'inventaire ne possèdent pas le même potentiel de pollution et elles ne possèdent pas également le même acheminement. Mais malgré cela ils seront parfois dans la même catégorie d'impact. Par exemple le dégagement de CO_2 et une émission du Pb dans l'eau présentent tous les deux un danger sur la santé humaine mais ce n'est pas avec le même potentiel. Ainsi, chaque substance émise peut être comparée aux autres selon sa capacité à endommager l'environnement et reliée à ses dommages environnementaux potentiels.

- *Les étapes d'analyse*

La démarche d'analyse des impacts se déroule en trois étapes qui sont :

- ✓ La classification
- ✓ La caractérisation
- ✓ L'évaluation

- *La classification*

La classification consiste à affecter les résultats de l'inventaire du cycle de vie, qui sont les différentes émissions et les consommations de ressources dans des catégories d'impact correspondant aux types de problèmes environnementaux retenus (effet de serre, destruction d'ozone, acidification, épuisement de ressources, etc.). Par exemple, les émissions de dioxyde de carbone et de méthane sont classifiées sous la catégorie d'impact effet de serre. Le choix des catégories d'impact est inclut aussi dans la classification et il doit prendre en compte les objectifs de l'étude.

Dans le cas de l'éco-conception d'une chaine de traction ferroviaire, la considération des catégories d'impacts tels que l'extinction des espèces et l'épuisement des ressources biotiques n'ont pas un intérêt pertinent contrairement à ceux de la destruction de la couche d'ozone (OD) et de l'émission de gaz à effet de serre (GW). En effet, durant son cycle de vie l'utilisation d'eau par exemple pour la chaine de traction du Tram Train est limitée à sa phase de fabrication uniquement. On note aussi, que les chemins de fer ne se considèrent pas comme une menace dans l'occupation des sols qui contribue à l'extinction des espèces.

- *La caractérisation*

La caractérisation consiste à convertir une catégorie d'impact à un indicateur de celle-ci. En effet, après la classification, une catégorie d'impact peut contenir plusieurs types d'émission, par exemple la catégorie effet de serre contient des émissions de CO_2 et CH_4, ces émissions sont converties à une émission de référence. Par exemple, pour la catégorie « effet de serre » l'émission de référence est le CO_2.

- *L'évaluation*

Il s'agit de calculer les indices de toutes les catégories d'impact en fonction de leurs émissions de référence.
Le calcul des coefficients de conversion des émissions et l'agrégation des différentes catégories d'impact peuvent être fait par différentes méthodes d'analyse d'impact.

Interprétation des résultats

C'est la dernière phase de l'ACV. Il s'agit de :

—réaliser une synthèse des bilans environnementaux

—exploiter ces bilans pour répondre au mieux aux objectifs choisis

I.3.3. Les méthodes de calcul d'impacts

Il existe plusieurs méthodes d'analyse dont les plus connues sont : CML2001, Eco-indicator99, Ecopoint97, EDIP'97, EPS2000, TRACI, IMPACT 2002+, la méthode des volumes critiques et le guide hollandais sur les ACV.

Méthode des volumes critiques

Cette méthode consiste à calculer, pour chaque quantité d'émission, le volume (en m^3) d'air, de sol ou d'eau pollué. Ce volume est obtenu par la division de la masse de polluant émis (en g) par la concentration limite $C_{l,p}$ de ce polluant fixée (en g/m^3) par l'ordonnance sur la protection d'air (OPA) [OPA-86] et de l'Ordonnance Fédérale de la confédération suisse sur le Déversement des Eaux Usées (OFDEU) [OFD-91].

Les résultats de cette méthode sont donnés en m^3 d'air critique, m^3 d'eau critique, m^3 de déchets solides et MJ d'équivalents énergétiques. Elle ne permet pas de comparaison entre les polluants de l'air, de l'eau et du sol. On y suppose qu'un seul polluant est contenu dans un volume donné, alors qu'en réalité plusieurs polluants peuvent être contenus dans le même volume. Les volumes obtenus sont de ce fait utilisables uniquement pour des comparaisons et n'ont aucun rapport avec les volumes réellement pollués.

Eco-facteurs97 (ecopoints97)

Cette méthode consiste à calculer les éco facteurs à partir des flux actuels des substances et des flux critiques. Les flux actuels sont estimés sur la base des données nationales d'émission les plus récentes alors que les flux critiques représentent les valeurs cibles visées par la politique environnementale suisse qui se base sur des études scientifiques [OFE-04].

Le résultat de cette méthode est une valeur S qui se calcule comme suit :

$$S = \Delta_i . M_i \; avec \; \Delta_i = \frac{10^{12}}{\emptyset_{ci}} \frac{\emptyset_{ai}}{\emptyset_{ci}}$$

Δ_i: $les\ eco - facteurs$

$\emptyset_{ai}$: $flux\ actuel\ de\ la\ substance\ i\ en\ suisse(tonne\ /\ an)$.

$\emptyset_{ci}$: *flux critique de la substance i en suisse* $(tonne\ /\ an)$

M_i: *masse de la substance i en tonne*

Les éco-facteurs s'expriment en UBP (l'abréviation d'écopoint en allemand, i.e. *UmweltBelastungPunkte*), où 10^{12} UBP représente le flux critique d'un polluant pendant une année. Le rapport $1/\emptyset_{ci}$ sert à normaliser la charge critique totale et plus ce flux est faible plus l'éco-facteur est élevé par conséquent le terme $\frac{\emptyset_{ai}}{\emptyset_{ci}}$ vient donner plus d'importance aux polluants qui ont des émissions actuelles supérieures aux limites admissibles.

Méthode EPS 2000d

La méthode EPS (*Environnemental Priority Strategies in Product Design*) a été développée en Suède par Ryding en 1993 [RYD-93] et actualisée par Steen en 1996 [STE-96] La philosophie de cette méthode consiste à valoriser les différents types de dommages en faisant appel à la notion de « volonté de payer » (*willingness to pay*) [STE-95]. Les unités sont exprimées en unités de charge environnementales ELU (*Environnemental Load Units*) et peuvent être agrégées en un indicateur unique.

Méthodes Eco-Indicateur99

La méthodologie d'Eco-Indicateur 99 a été développée de haut en bas (*top down*), en partant des dommages sur la santé humaine, sur l'écosystème et les ressources minérales et fossiles pour identifier les effets générant les impacts les plus importants et les relier aux émissions de l'inventaire. Eco-Indicateur est la première méthode qui évalue de façon cohérente les dommages au niveau des ressources, de la santé humaine et de la qualité de l'écosystème [ECO-99]. Ceci en fait l'une des méthodes les plus intéressantes à appliquer.

Impact 2002+

C'est la méthode la plus récente. Elle permet une évaluation au niveau des catégories d'impacts et des dommages. Le déroulement de cette méthode est comme suit : les résultats de l'inventaire sont groupés dans quatorze catégories d'impacts appelées aussi catégories intermédiaires (*midpoint categories*) qui sont à leur tour affectés à quatre catégories de dommages représentant les changements de qualité de l'environnement [IMP-03].

Guide hollandais sur les ACV

Cette méthode est la version 2002 de CML92 inventée par Heujings en 1992 [HEU-92]. La méthode CML était l'une des méthodes les plus appliquées en Europe pour évaluer les impacts durant le cycle de vie d'un produit. Cette méthode n'évalue pas les dommages du produit concerné par l'étude mais il s'arrête au niveau intermédiaire (*midpoint*). Cette méthode se déroule en quatre étapes (classification, caractérisation, normalisation et évaluation).

I.3.4. Logiciels de gestion environnementale

L'étape de l'inventaire est la plus lourde. En effet, souvent le nombre d'émissions ainsi que les ressources utilisées sont des informations qui peuvent être parfois inaccessibles ou difficiles à trouver.

Pour alléger cette étape, des logiciels de gestion environnementale sont utilisés. Ces logiciels permettent de modéliser toutes les étapes d'une analyse du cycle de vie. Ils comportent généralement une ou plusieurs bases de données et disposent d'une ou de plusieurs méthodes d'évaluation des impacts. Les plus complets sont :

EcoDS ®

En anglais, c'est *Environmentally Conscious Decision Support System* (EcoDS) qui a été créé en 1997 par l'Eco Group du professeur D. Hunkeler [HUN-97] du Laboratoire de chimie des polymères et biomatériaux (LPBM) du département de chimie de l'EPFL.

La base théorique d'EcoDS est née aux Etats-Unis dans l'Université de Vanderbilt à Nashville. Le système était créé pour donner une alternative viable à l'évaluation des impacts sur cycle de vie. A partir de renseignements fournis par les ingénieurs et managers, il est possible de donner des résultats rapides et fiables. L'utilisation du logiciel est simple: le système pose des questions à choix multiples, simples mais spécifiques, et ensuite déduit les composants qui, durant chaque phase du cycle de vie, ont le plus grand impact sur l'environnement. Il fournit également des alternatives. Il s'agit d'un outil d'aide utilisé pour justifier des évaluations plus complexes.

SimaPro®

SimaPro est un logiciel développé en 1990. Aujourd'hui c'est le logiciel le plus connu et le plus utilisé dans le monde car il présente tous les points forts d'un logiciel de gestion environnementale que sont : l'utilisation de plusieurs bases de données très riches (matériaux et procédés), une interface graphique très simple à utiliser et la possibilité de choisir la méthode d'analyse d'impact (CML, EDIP, Eco indicateur). SimaPro permet d'évaluer un produit et aussi de comparer et d'analyser plusieurs produits.

Gabi ®

C'est le principal concurrent de SimaPro. En effet, ce logiciel contient une gigantesque base de données utilisée et développée par des centaines de grandes industries. GaBi est un outil qui permet la construction de bilan sur le cycle de vie et est capable de calculer les impacts environnementaux d'un produit sur son cycle de vie.

EIME

Le logiciel EIME® est une copropriété entre les grands groupes développeurs de ce logiciel et l'entreprise CODDE (Conception Développement Durable Environnement). EIME® est une émanation du syndicat des fabricants d'appareils électriques et électroniques et répond bien aux besoins de modélisation environnementale de ces métiers. Ce logiciel permet de

calculer 11 impacts environnementaux durant toutes les phases du cycle de vie du produit en fonction des diverses données et paramètres entrés.

CMLCA®

Chain Management by Life Cycle Assessment (CMLCA) est un logiciel gratuit qui aide à la réalisation d'une analyse du cycle de vie. Ce logiciel ne dispose pas d'une interface très attrayante ni d'un outil de présentation des graphiques permettant de multiples fantaisies. Par contre, il est capable de calculer des boucles dans les procédés et permet également de résoudre des règles d'imputation relativement compliquées (exemple de boucle : la production de l'acier nécessite du charbon et la production du charbon nécessite de l'acier). Le programme ne contient ni base de données, ni méthode d'évaluation des impacts mais celle-ci peuvent être créées ou importées.

TEAM™ ®

TEAM™ est l'outil d'Analyse de Cycle de Vie de produits d'Ecobilan. Il permet à l'utilisateur de construire et de gérer de larges bases de données et de modéliser n'importe quel système représentant les différentes opérations relatives aux produits, aux procédés et aux activités d'une entreprise.

Umberto ®

Umberto est un outil d'analyse du cycle de vie qui utilise une interface graphique pour réaliser des diagrammes de flux. Il dispose également d'un système d'évaluation des impacts.

I.3.5. Récapitulatif

Sous l'urgence environnementale de sauver la planète, les états et les sociétés ont poussé les entreprises et les industries de tous les domaines, y compris électriques et ferroviaires, à adopter le concept de développement durable dont l'éco-conception est une piste efficace parmi d'autres. L'éco-conception consiste à prendre en compte l'environnement dès la phase de conception des produits. Pour réussir l'éco-conception, il faut adapter une démarche d'analyse de cycle qui se déroule en quatre étapes : fixer les objectifs et délimiter le champ d'étude, réaliser l'inventaire de cycle de vie, analyser les impacts par l'une des méthodes détaillées précédemment et interpréter les résultats. L'étape de l'inventaire est très lourde à réaliser. Pour l'alléger, plusieurs logiciels de gestion environnementale sont disponibles et permettent de regrouper les émissions et les ressources consommées sous une dizaine d'impact ou de catégories d'impact.

I.4. Chaine de traction ferroviaire et sa modélisation

La figure I.6 présente une description sommaire d'une chaine de traction ferroviaire. La caténaire assure la liaison entre le réseau électrique et le transformateur principal suivi des coffres de traction qui contiennent les étages de conversion nécessaires pour alimenter et piloter les moteurs de traction.

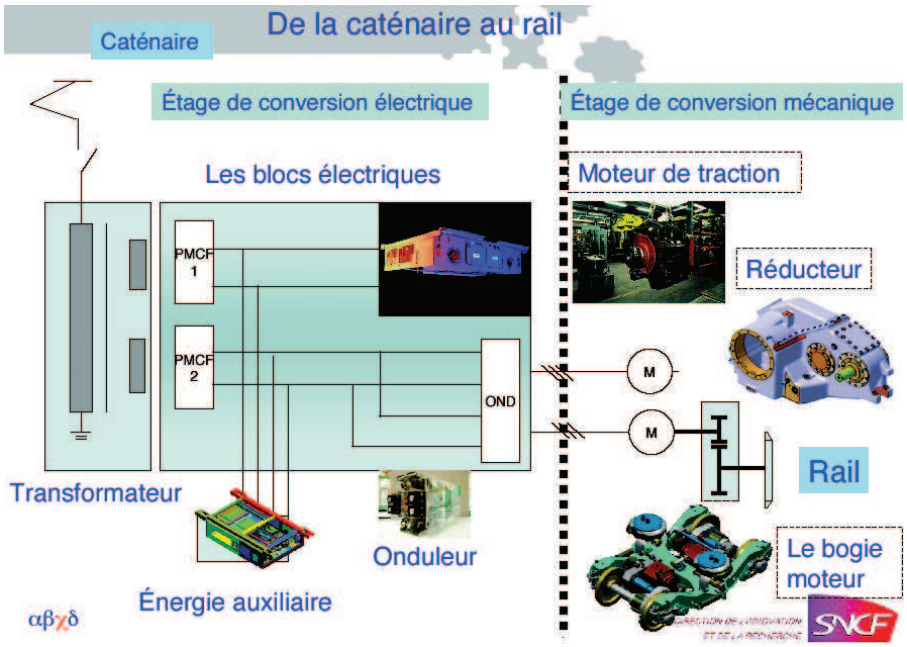


Figure I.6 : Description sommaire d'une chaîne de traction ferroviaire [CONV-08]

La chaine de traction est constituée principalement de trois composants électriques qui sont :

- Le transformateur de traction qui sert à abaisser la tension d'entrée et doit passer toute la puissance électrique utilisée par le train pour les fonctions traction, auxiliaires, batteries et sécurité.
- Le coffre de traction contient le pont monophasé à commutation forcé (PMCF), un bus continu pour le filtrage, un onduleur et d'autres dispositifs de lissage et de filtrage. La principale fonction de ce coffre est la commande des moteurs de traction et la minimisation des harmoniques de courant renvoyés à la caténaire.
- Les moteurs de traction permettent de convertir l'énergie électrique en une énergie mécanique.

I.4.1. Modélisation

La modélisation est la conception d'un modèle qui permet d'analyser des phénomènes réels et de prévoir des résultats grâce à l'application des théories à un niveau d'approximation donné. Toutefois, le modèle n'est pas la réalité mais il tente de s'y approcher avec un niveau de précision plus au moins important. Dans la littérature, on trouve trois sortes de modèles.

La méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est un moyen puissant de modélisation qui consiste à découper le domaine spatiale étudié en petits éléments et d'interpoler les fonctions étudiées dans ces éléments [CRA-08].

Les modèles éléments finis sont utilisés généralement dans le domaine du génie électrique pour valider des résultats ou modéliser des phénomènes dont les lois physiques sont difficiles

à élaborer ou ne sont pas encore bien maitrisées tels les effets de bords et les flux fuites. Rarement, ces modèles sont utilisés dans des processus d'optimisation direct car les algorithmes d'optimisation sont souvent sensibles au bruit numérique et leur temps de calcul est très important (une seule évaluation peut prendre des heures) [RBA-12].

Les modèles de substitution

Ce type de modélisation est utilisé dans des domaines (nucléaire, économique, etc.) où les phénomènes physiques dans le système étudié sont inconnus ou aléatoires. Il consiste à remplacer le système par un modèle qui fournit des résultats à partir d'une interpolation des données recueillies sur le système réel. Par exemple, les modèles à base de réseaux de neurones, les modèles basés sur les surfaces de réponses [STA-09] comme les modèles kriging [RBA-12a] sont souvent utilisés comme des modèles de substitution.

Modélisation paramétrique

Ce type de modélisation permet à l'utilisateur de modifier des paramètres dans le modèle. Généralement, un modèle paramétrique est basé sur une agrégation des lois de la physique exprimée sous forme d'un modèle analytique ou semi-analytique qui peut être plus ou moins compliqué.

Les modèles analytiques peuvent représenter le comportement global d'un dispositif ou être plus détaillés pour calculer des phénomènes locaux. Ils sont souvent développés par les ingénieurs au fur et à mesure de leur expérience et sont des outils très efficaces. Ces modèles sont adaptés et validés en fonction des besoins et des développements [GIL-09].

Les modèles analytiques représentent des capitalisations du savoir-faire des concepteurs et ils ont l'avantage d'être très souple et rapide.

Particularités des modèles des composants ferroviaires

Les composants ferroviaires sont des produits spécifiques et particuliers. En effet, Ces composants présentent des difficultés au niveau de leur modélisation car ils impliquent plusieurs disciplines qui interagissent entre elles. L'élaboration des modèles rapides et précis pour certains composants ferroviaires est souvent impossible. En effet, pour des composants comme les transformateurs ou les selfs, les formules analytiques ne décrivent pas parfaitement les phénomènes de fuites ou de couplage entre enroulements. Donc, le concepteur utilise pour certains cas des modèles numériques tels que les modèles éléments finis qui sont très précis mais qui ont un temps de calcul lourd.

Les composants ferroviaires sont conçus pour des applications embarquées qui nécessitent la prise en compte de plusieurs contraintes telles que des contraintes de volume, de masse et de température. Avec ces contraintes viennent s'ajouter des contraintes environnementales. Ainsi, pour être exploités dans une optimisation, ces modèles doivent être capables de calculer tous les objectifs et les contraintes fixés dans le cahier des charges.

Pour conclure, dans le domaine ferroviaire les deux types de modèles fréquemment utilisées sont les modèles semi-analytiques [ROS-10] et les modèles éléments finis [HAY-08], [WIL-08] et les modèles analytiques [AKL-08], [FAS-07] et [MOU-09].

Un exemple d'utilisation des modèles analytiques dans la modélisation ferroviaire est le logiciel CITHEL développé par ALSTOM.

CITHEL®

CITHEL est un logiciel spécifique à ALSTOM TRANSPORT pour la modélisation des chaines de traction ferroviaire. Il permet de simuler une chaine de traction sur un parcours donné pour estimer sa consommation d'énergie, la puissance mécanique fournie, les pertes dans quelques composants (moteurs et modules), les températures de certains composants, telles que celles des jonctions des composants semi-conducteurs, celle de l'huile dans le transformateur et d'autres grandeurs. La figure I.7 montre une simulation de la chaine de traction du Tram Train sur un parcours représentatif d'un service commercial.

Certaines informations fournies par CITHEL sont primordiales pour l'éco-conception telles que les énergies consommées par les pertes dans les composants sur un parcours. A partir de ces informations, on peut déduire facilement l'énergie perdue totale de la chaine sur son parcours, ce qui va nous permettre de déduire ses impacts environnementaux pendant sa phase d'utilisation.

Figure I.7 : exemple de simulation de la ChT du Tram Train sur CITHEL

I.4.2. L'optimisation au service de l'éco-conception

Souvent dans l'éco-conception des composants électriques, y compris les composants ferroviaires, on cherche à minimiser un impact économique tout en améliorant une performance environnementale.

Ces objectifs sont, d'une part, contradictoires et, d'autre part, plusieurs types de modèles sont disponibles pour ce genre de composants. Ainsi, les méthodes d'optimisation multi-objectif, multidisciplinaire et multi-niveau peuvent offrir des solutions innovantes pour l'éco-conception des chaînes de traction ferroviaire.

Optimisation multi-objectif

L'optimisation multi-objectif est apparue les premières fois dans les travaux d'Edgeworth [EDG-81] et Pareto [PAR-96] en économie et dans les sciences de management, puis elle a été utilisée graduellement dans les sciences de l'ingénieur.

Les problèmes d'optimisation issus des problématiques réelles sont la plupart du temps de nature multi-objectif car plusieurs critères d'évaluation souvent contradictoires sont à considérer simultanément. Pour résoudre un problème d'optimisation multi-objectif, plusieurs méthodes existent et peuvent être classées sous deux catégories qui sont les méthodes déterministes et probabilistes.

La résolution de ces problèmes d'optimisation aboutit généralement à un ensemble de solutions (compromis) sous la forme d'un front appelé front de Pareto. Le choix d'une solution finale appropriée aux demandes du marché et des clients est fait par un expert.

Avant de se lancer dans la résolution d'un problème d'optimisation, il est indispensable de choisir la démarche appropriée. En effet, les démarches d'optimisation sont classées selon [COL-02] et [FLI-05] en trois familles : les démarches d'optimisation *a priori*, les démarches d'optimisation *a posteriori* et les démarches d'optimisation progressive.

- Les démarches d'optimisation *a priori* : Dans ce cas, le compromis désiré entre les objectifs a été défini avant l'exécution de l'optimisation. Ainsi une seule exécution permettra d'obtenir la solution recherchée. Cette approche est donc rapide, mais il faut cependant prendre en compte le temps de modélisation du compromis et la possibilité pour l'expert de ne pas être satisfait de la solution trouvée et de relancer la recherche avec un autre compromis.

- Les démarches d'optimisation progressive : Ici, l'expert intervient dans le processus de recherche de solutions en répondant à différentes questions afin d'orienter la recherche. Cette approche permet donc de bien prendre en compte les préférences de l'expert mais nécessite sa présence tout au long du processus de recherche.

- Les démarches d'optimisation *a posteriori* : Dans cette troisième famille de démarches, on cherche à fournir au décideur un ensemble de bonnes solutions bien réparties. Il peut ensuite, au regard de l'ensemble des solutions, sélectionner celle qui lui semble la plus appropriée. Ainsi, il n'est plus nécessaire de modéliser les préférences de l'expert (ce qui peut s'avérer être très difficile), mais il faut en

contrepartie fournir un ensemble de solutions bien réparties, ce qui peut également être difficile et requérir un temps de calcul important (mais ne nécessite pas la présence de l'expert).

Pour les trois démarches présentées, il faut avoir recourt à des algorithmes d'optimisation. Parmi les plus souvent utilisés, on peut citer les méthodes déterministes qui transforment le problème multi-objectif en une série de problèmes mono-objectif qui sont résolus par des méthodes à base de gradient, telles que les méthodes quasi-Newton. Les principales méthodes de transformation développées de façon à obtenir l'ensemble ou une partie du front de Pareto sont la somme à pondération variable des objectifs et la transformation des objectifs en contraintes à valeur limite variable.

La méthode de pondération est également appelée méthode d'agrégation linéaire. Cette méthode populaire transforme le problème multi-objectif en un problème mono-objectif en combinant linéairement les différents objectifs. En effet, le problème devient à optimiser $\sum_i \lambda_i f_i$. Geoffrion a montré dans [GEO-68] qu'en utilisant différentes valeurs pour le vecteur λ, il est possible d'obtenir toutes les solutions supportées du problème multi-objectif initial.

La méthode *ε-contraintes* a été utilisée la première fois dans [HAI-71]. Le principe de cette méthode consiste à borner l'un des objectifs (en général le plus difficile à résoudre) et optimiser l'autre objectif (optimisation mono-objectif) en tenant en compte de cette borne. Cette méthode est intéressante pour énumérer toutes les solutions d'un front Pareto.

Les algorithmes évolutionnaires multi-objectifs sont également fréquemment utilisés, notamment pour les démarches d'optimisation dites *a posteriori*. Le premier travail dans ce domaine est celui de Shaffer en 1985 cité dans [KON-06] par la proposition de l'algorithme VEGA (*Vector Evaluated Genetic Algorithm*). Ce travail a été suivi par le travail de Goldberg [GOL-88] qui a consisté à utiliser la notion d'optimalité de Pareto dans la sélection des individus. Ces travaux ont donnée naissance à différents algorithmes évolutionnaires multi-objectifs tels que MOGA [KON-06], NSGA [SRI-94] et NPGA [HOR-94]. Dans ces algorithmes, la qualité d'une solution est évaluée en fonction de sa dominance au sein de la population et la diversité maintenue à l'aide de la stratégie de niche (*niching* en anglais). Puis, dans le but d'assurer la convergence vers le front de Pareto, la question de préservation de l'élite est devenue fondamentale. Ainsi de nouveaux algorithmes, pouvant faire intervenir ou non des archives de solutions non-dominées ont été proposées. Parmi ces algorithmes élitistes, il y a SPEA [ZIT-99], PAES [KNO-00] ou encore NSGA-II [DEB-02].

Optimisation multidisciplinaire

Les systèmes complexes font intervenir plusieurs disciplines présentant des interactions entre-elles. Dans ce cas, le problème de modélisation est souvent découpé en plusieurs sous problèmes, ainsi le modèle du système est décomposé en plusieurs sous-modèles dont chacun représente une discipline.

L'optimisation multidisciplinaire (MDO) est un outil qui permet d'utiliser les modèles multidisciplinaires dans des processus d'optimisation. En effet, la MDO contient des formulations qui, dès la phase de conception, permettent de résoudre les interactions entre disciplines et le problème d'optimisation dans le même processus : Il s'agit de construire un modèle abordable par l'optimisation.

Ces formulations sont groupées sous deux familles : les formulations mono-niveau et les formulations multi-niveau. Seules les formulations mono-niveau seront abordées dans cette thèse. Ces formulations sont : Multidisciplinary Feasible (MDF) [ALE-99], Individual Discipline Feasible (IDF) [CAR-94] et All At Once (AAO) [TEL-06]. Elles seront détaillées dans le chapitre III.

Optimisation avec modèles éléments finis

Pour certains composants, la modélisation de certaines grandeurs ou phénomènes physiques ne peut pas se faire d'une façon analytique à cause de l'indisponibilité de ces modèles (le cas des flux de fuites, les effets de bords, etc.) ou l'insuffisance de leur précision. Dans tels cas, le concepteur recourt à des outils de modélisation plus puissants comme les modèles éléments finis (MEF).

L'utilisation directe des MEF dans des procédures d'optimisation appelées aussi « single level optimization (SLO)» est très lourd en temps de calcul [RBA-11a] et aboutit parfois à des résultats non satisfaisants [RBA-12]. En effet, les MEF sont très sensibles au bruit numérique et à la qualité du maillage [NEI-96] d'une part et d'autre part au cours d'une optimisation le MEF peut être évalué des centaines ou des milliers de fois sachant qu'une seule évaluation d'un tel modèle peut prendre des heures.

L'optimisation directe avec des MEF n'est pas intéressante ni en temps de calcul ni en pertinence, c'est pourquoi le space-mapping (SM) est une alternative intéressante à la SLO.

Optimisation multi-niveaux de granularité

Le space-mapping est une méthode de projection inventée par J. Bandler et al. en 1994 [BAN-94]. Elle consiste à faire l'optimisation par un modèle grossier (rapide) et de projeter la solution obtenue dans l'espace des solutions EF. La projection se fait par l'évaluation de la solution optimale par le MEF qui est précis mais très lourd en temps de calcul.

Cette technique a été utilisée dans l'optimisation des convertisseurs électromagnétiques présentant des modèles lourds [BAN-94], [ECH-06]. Elle contient plusieurs variantes dont les plus connues sont : aggressive space-mapping (ASM) [BAN-95], manifold mapping (MM) et output space-mapping (OSM) [ENC-08]. ASM est la plus ancienne et nécessite une extraction du gradient du modèle fin qui est souvent très délicate et très compliquée. MM et OSM évitent cette procédure d'extraction. MM utilise une technique de correction de défaut qui modifie à chaque itération de l'algorithme la valeur de la fonction objectif. Quant à la technique d'OSM, elle utilise des correcteurs qui permettent d'aligner le modèle fin et le modèle grossier.

I.5. Conclusion

Après avoir pris conscience de la gravité de la situation environnementale et des menaces sur la vie humaine, les états et les sociétés ont poussé les industries vers une production qui suit une stratégie de développement durable. L'éco-conception est une solution intéressante qui permet de réussir cette stratégie qui vise à conserver l'environnement pour le bien des êtres humains.

L'éco-conception est une conception qui tient en compte de nouvelles contraintes telles que les impacts environnementaux afin d'obtenir des produits plus respectueux à l'environnement. L'ajout de ces nouvelles contraintes rend la tâche de conception plus difficile car elle limite l'espace de faisabilité des solutions. Pour surmonter ces difficultés, les concepteurs recourent à l'optimisation multi-objectif qui offre des outils pour résoudre des problèmes difficiles tout en réduisant les impacts environnementaux des produits.

La modélisation des composants ferroviaires implique plusieurs disciplines en interaction qui rendent la construction de leurs modèles complexe et délicate. Afin de faciliter cette tâche, l'optimisation multidisciplinaire apporte des solutions bien adaptées à l'éco-conception. Un modèle multidisciplinaire est un regroupement de sous-modèles qui interagissent entre eux pour calculer les objectifs environnementaux et économiques. L'éco-conception consiste à trouver les solutions qui présentent un bon compromis entre les objectifs contradictoires calculés par le modèle multidisciplinaire. Cette tâche s'avère très difficile pour le concepteur car ces solutions s'obtiennent en résolvant un problème d'optimisation où il faut gérer l'aspect contradictoire des objectifs, les couplages entre modèles disciplinaires, la sensibilité des modèles au bruit numérique (cas des modèles EF), le caractère discret de certaines variables d'optimisation, les contraintes de bon fonctionnement du système, etc.

L'optimisation offre des outils intéressants qui permettent au concepteur de surmonter les difficultés qu'il peut rencontrer dans un problème d'éco-conception. En effet, les algorithmes multi-objectif peuvent résoudre des problèmes d'optimisation avec des objectifs contradictoires, les formulations MDO gèrent les couplages entre disciplines dans un processus d'optimisation, certains algorithmes d'optimisation peuvent résoudre efficacement des problèmes avec des variables mixtes (continues et discrètes), les techniques de space-mapping permettent d'éviter les inconvénients (bruit numérique et temps de calcul important) de l'optimisation avec des modèles lourds et sensibles tels que les modèle EF, etc.

II. Chapitre 2 : Analyse de Cycle de Vie du Tram Train

II.1. Introduction

L'analyse de cycle de vie (ACV) est un outil environnemental multicritères qui est utilisé dans des applications environnementales multiples dont les plus connues dans le domaine du génie électrique sont l'évaluation et l'amélioration de la performance environnementale d'un produit [DEB-09] ou d'un processus de fabrication [JAN-00]. Dans ce chapitre, l'ACV est exploitée non seulement pour évaluer et améliorer les performances du Tram Train mais aussi pour comparer les performances environnementales des différents composants de la chaine afin d'identifier le plus polluants. Cette information est une aide à la décision pour le choix des pistes de réduction des impacts environnementaux les plus prometteuses. En effet, chaque piste nécessite la construction de modèles spécifiques ainsi que des démarches de conception par optimisation adaptées pour intégrer efficacement les impacts environnementaux. Du fait du temps limité dont nous disposons, il faudra réduire le nombre de pistes investiguées. Parmi ces pistes, on peut citer par exemple la substitution de matériaux et l'amélioration de l'efficacité énergétique.

II.2. Démarche ACV pour la chaine de traction du Tram Train

II.2.1. Définition du champ d'étude et des objectifs

Dans notre étude nous avons fixé avec notre partenaire ALSTOM TRANSPORT les objectifs et le champ d'étude suivant :

- Le champ d'étude est limité à la chaine de traction du Tram Train (uniquement la partie électrique)
- L'évaluation de l'inventaire de cycle de vie est faite par le logiciel de gestion environnementale EIME® (*Environnemental Information and Management Explorer*).
- La minimisation des impacts environnementaux grâce à l'identification de pistes d'amélioration.
- La détermination des aspects environnementaux significatifs et un support pour la définition des modèles environnementaux qui seront utilisés dans une méthodologie d'optimisation.

II.2.2. Inventaire de cycle de vie

Dans l'inventaire de cycle de vie (ICV) du Tram Train nous devrons réaliser un bilan quantitatif de tous les flux entrants et sortants pour chaque composant de la chaine. Chaque processus utilisé, émissions provoquées et énergies consommées par le produit sur les différentes phases de son cycle de vie doivent être comptabilisés. Pour illustrer ce fait, un exemple d'ICV d'un kilogramme d'acier est montré dans la figure II.5 [PON-08]. Dans cet exemple, nous comptons entre les flux entrants et sortants plus d'une quarantaine d'émissions liquides, solides et gazeuses. Ainsi, la réalisation d'un inventaire de la chaine de cette façon est trop chronophage. En effet, les composants ferroviaire sont des composants qui utilisent beaucoup de matériaux (acier, cuivre, aluminium, zinc, laiton, nickel, chrome, etc.) et qui sont

constitués de plusieurs sous-composants (pompe, groupe de ventilation, radiateurs, moteurs, etc.) qui contiennent à leur tour des dizaines de matériaux.

Groupe	Substance	Quantité	Groupe	Substance	Quantité
Entrants			Sortants (suite)		
Énergie	Électricité	3,3 MJ	*Émissions gazeuses*	HAP	0,1 mg
	Pétrole	3,1 MJ		Poussières	1,5 g
	Gaz naturel	4,8 MJ	*Résidus solides*	Particules	11,7 mg
Ressources	Charbon	517 g		Déchets dangereux	1,6 g
	Calcaire	162 g		Déchets industriels	96,4 g
	Minerais de fer	2 170 g		Déchets minéraux	1 100 g
Sortants			*Rejets liquides*	Al	0,5 mg
Émissions gazeuses	As	19 ng		As	2 mg
	CH_4	4 g		Cl	181 mg
	CO	0,05 g		DCO	25,6 mg
	CO_2	1 180 g		Cr	49 mg
	Cr	0,4 mg		Cu	0,1 mg
	Cu	0,2 mg		F	2 mg
	Hydrocarbures	62,6 mg		Fe	7,2 mg
	HCl	41,8 mg		Mn	3,1 mg
	HF	56,2 mg		Ni	0,1 mg
	Hg	0,03 mg		NH_3	5,2 mg
	Mn	3,1 mg		Pb	0,4 mg
	Ni	0,4 mg		P total	0,4 mg
	Pb	0,5 mg		SO_4^-	259 mg
	Zn	3,7 mg		Sr	5,2 mg
	NO_x	1,5 g		Zn	1 mg
	SO_2	1,5 g		MES	43,3 mg

Figure II.1 : ACV d'un kilogramme d'acier

Pour alléger l'étape de l'ICV, notre partenaire nous a proposé d'utiliser le logiciel EIME®.

Ce logiciel a été choisi parmi ceux présentés dans le premier chapitre car :

- Il est dédié aux industries qui fabriquent des appareils électriques et électroniques.
- Il comporte une base de données très riche qui contient plusieurs matériaux, composants et processus avec tous leurs flux entrants et sortants.
- Ce logiciel possède une interface graphique très simple et très facile à utiliser.
- Il permet d'alerter l'utilisateur lorsqu'un matériau non conforme à la directive *RoHS* est utilisé dans la modélisation d'un composant.
- Une fois l'évaluation du produit terminée, EIME® peut indiquer la contribution de chaque matériau ou processus utilisé dans les différents impacts calculés. Par exemple, pour voir la contribution de l'aluminium aux impacts d'un produit, il suffit de choisir la commande de suivi, c.-à-d. « *add to tracking* ».
- EIME® permet aussi de regrouper tous les types d'émissions causées par un produit, (gazeuses, liquides et solides) en 11 catégories d'impacts et ceci dans un temps très court. Cela permet de simplifier la troisième étape de l'ACV qui est l'analyse des impacts.

Les 11 impacts calculés par EIME® sont :

- **Epuisement des ressources naturelles (***raw material depletion*, RMD) : cet impact traduit le rapport des quantités de matières premières utilisées dans un produit sur son cycle de vie et celles qui sont disponibles et exploitables par l'homme. En d'autre terme, cet impact traduit la rareté des matériaux utilisés. Par exemple, l'impact RMD du cuivre est plus élevé de celui de l'acier car les ressources en cuivre sont plus rares que celles en acier.
- **Consommation d'énergie (***energy depletion*, ED) : cet impact quantifie en MJ l'énergie consommée sur le cycle de vie d'un produit, quelle que soit la source (pétrole, gaz, charbon, etc.)
- **Consommation d'eau (***water depletion*, WD) : l'impact WD quantifie en dm^3 l'utilisation de l'eau sur le cycle de vie du produit.
- **Réchauffement Climatique (***global warming,* GW) : cet impact regroupe 48 des gaz à effet de serre dont l'effet est exprimé en grammes équivalent CO_2.
- **Destruction de la couche d'ozone (***ozone depletion*, OD) : Sous cette catégorie d'impact, on trouve des émissions gazeuses qui contribuent à la dégradation de la couche d'ozone par réaction chimique. Ces émissions sont traduites en grammes équivalent de CFC_{11}.
- **Toxicité de l'air (***air toxicity*, AT) : cet indicateur comptabilise les volumes critiques émis vers l'air de substances appartenant aux listes de substances toxiques en usage dans la communauté européenne. L'impact AT traduit le potentiel d'un produit à émettre des émissions nocives dans l'air. Parmi ces émissions, on trouve l'ammoniac, le chlorure d'hydrogène, etc.
- **Création de l'ozone photochimique (***photochemical ozone creation*, POC) : L'indice d'impact POC comptabilise en grammes équivalent de C_2H_4, les émissions (toluène, benzène, acétone, etc.) vers l'air ayant un effet direct ou indirect sur la création de d'ozone.
- **Acidification de l'air (***air acidification*, AA) : Cette catégorie d'impact regroupe les émissions qui contiennent principalement l'ion H^+ qui est l'acteur des pluies acides.
- **Toxicité de l'eau (***water toxicity***,** WT**) :** L'indice d'impact WT traduit le potentiel d'un produit à augmenter la concentration des toxines dans l'eau.
- **Eutrophisation de l'eau (***water eutrophication*, WE) : Cet impact comptabilise en grammes équivalent d'ions PO_4^{3-}, les substances qui ont un effet d'enrichissement des eaux par les engrais chimiques.
- **Production de déchets dangereux (***hazardous waste production***,** HWP**)** : Il représente la quantité des déchets dangereux produits en fin de vie et figurant sur les listes en usage dans la communauté européenne.

La diversité des impacts calculés par EIME® laisse des variantes de choix aux concepteurs sur le critère environnemental qu'ils veulent privilégier.

Grace à ce logiciel, la tâche de l'ACV se réduit à collecter les flux entrants et sortants pour les différents composants électriques de la chaine de traction ferroviaire.

Les flux entrants pour la chaine de traction

Dans cette partie, nous présentons, pour raison de confidentialité, des extraits des matériaux utilisés dans les différents composants de la chaine. Les quantités des matériaux

utilisées qui permettent de calculer, à l'aide d'EIME®, les impacts environnementaux des différents composants pendant leurs phases de conception sont donnés par ALSTOM TRANSPORT, ses fournisseurs ou ses sous-traitants.

Matériaux dans le transformateur de traction

Figure II.2 : Transformateur de traction du Tram Train

Les principaux matériaux utilisés dans le transformateur de traction sont :

- Noyau fabriqué avec des tôles magnétiques
- Enroulement primaire et secondaire
- Cuve en acier afin de retenir l'huile
- Huile utilisée pour l'isolation et la réfrigération.
- Connexions, isolation solide (papier, vernis, etc.)

Matériaux dans le coffre de traction

Photo supprimée pour des raisons de confidentialité

Figure II.3 : Coffre de traction d'un Tram Train

Le coffre de traction contient plusieurs équipements et étages de conversion de puissance afin de piloter les moteurs de traction et alimenter les auxiliaires. Il contient principalement :

- Un pont monophasé à commutation forcée (PMCF) qui est un redresseur constitué d'interrupteurs commandés qui contiennent :
  - Des composants semi-conducteurs en silicium
  - Des boitiers en plastiques
  - Des connexions en cuivre.

- Un bus continu constitué de deux condensateurs pour filtrer la tension à la sortie du PMCF. Les condensateurs constitués principalement :

    - Un boitier en aluminium
    - Du cuivre
    - Soudure en étain et plomb
    - Un alliage de laiton

- Un filtre « 2f » constitué d'une self est d'un condensateur. Les matériaux utilisés principalement dans la self sont :

    - Le cuivre
    - L'aluminium

- Un onduleur constitué par les mêmes packs utilisés dans le PMCF.

- Des accessoires de fixation et d'isolation, des joints, etc. fabriqués en :

    - Ferrites
    - Polyester
    - Silicone

- Des composants électroniques de faible puissance utilisés dans la commande des semi-conducteurs (des résistances, des capacités, des circuits intégrés, etc.)

Matériaux dans le moteur de traction

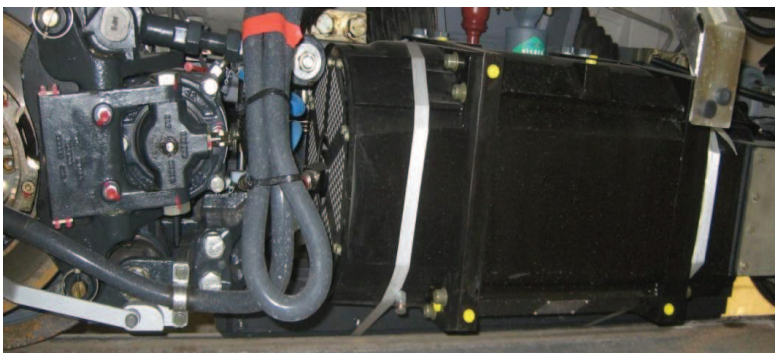


Figure II.4 : Moteur de traction du Tram Train

Le moteur de traction est une machine synchrone à aimants permanents constituée principalement de :

- Aimants fractionnés et isolés entre eux.
- Stator et rotor en tôle magnétique feuilletée
- Conducteurs en cuivre
- Résine pour fixer les aimants

Grâce aux différentes quantités de matériaux récoltées précédemment pour les principaux composants de la chaine de traction, nous pouvons modéliser avec EIME® la phase de fabrication et quantifier les ressources et les énergies consommées durant cette phase. Pour modéliser la phase d'utilisation, il faut déterminer les consommations énergétiques des composants.

Pertes des composants de la chaine

Pour quantifier les pertes dans les principaux composants de la chaine, nous avons utilisé CITHEL®, un outil d'ALSTOM TRANSPORT pour simuler les chaines de traction sur des parcours de mission. Pour la chaine de traction du Tram Train, un parcours énergivore a été choisi.

La figure II.4 montre l'interface graphique de CITHEL® après une simulation.

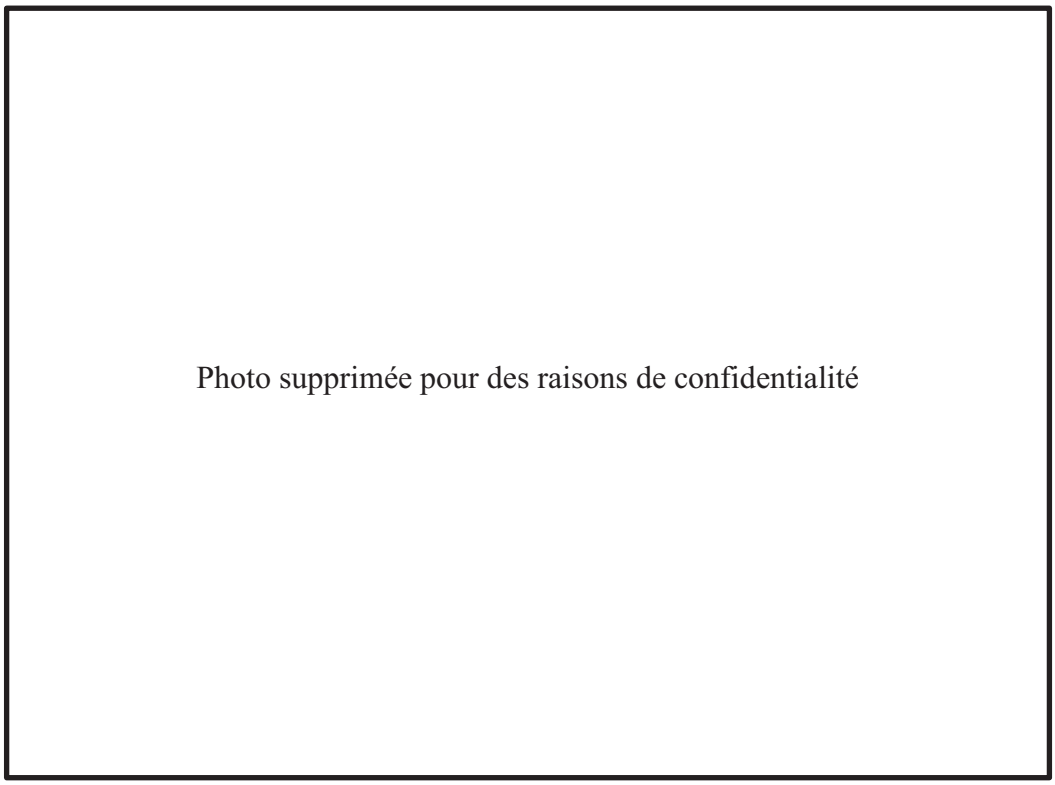


Figure II.5 : Interface graphique CITHEL® après une simulation de la chaine de traction sur le parcours choisi.

Energie totale perdue

L'énergie perdue que nous l'avons désignée par « E_loss » est exprimée en fonction de deux énergies estimées par CITHEL qui sont « Eln » et « Ew_T ».

$$E_loss = Eln - EwT \quad (kWh) \tag{II.1}$$

avec :

Eln : Énergie totale demandée à la caténaire (estimée par CITHEL® en kWh)

Ew_T: Énergie de traction fournie sur une roue (estimée par CITHEL® en kWh)

Pertes dans les moteurs de traction

Les pertes dans les moteurs désignées par « Loss_M » sont calculées par la somme des différentes pertes dans les six moteurs de traction. Ces pertes sont calculées par CITHEL® sur le parcours choisi en fonction du temps par :

$$\text{loss_M} = 6(\text{W1s} + \text{W2s} + \text{W3s} + \text{W4s} + \text{W5r}) \quad (\text{kW}) \tag{II.2}$$

avec:

W1s: pertes dans les enroulements du stator (kW).

W2s: pertes dans les dents statoriques + 20% des pertes harmoniques qui proviennent de l'onduleur situé à l'entrée du moteur de traction (kW).

W3s: pertes dans la culasse du stator (kW).

W4s: pertes mécaniques (kW).

W5r: 80% des pertes harmoniques (kW).

Pertes mécaniques dans le réducteur de vitesse

Les pertes mécaniques dans le réducteur de vitesse, sur le parcours, sont déduites à partir du couple moyen fourni par un moteur de traction « Torque », la vitesse de rotation « Rpm » et la puissance totale récupérée sur les roues « powerW ».

$$\text{loss_gear} = 6.\text{Torque}.\text{Rpm}.2.\pi/60\text{-powerW} \quad (\text{kW}) \tag{II.3}$$

avec:

Torque: couple mécanique moyen fournie par le moteur (Nm).

Rpm: vitesse de rotation du moteur (tr/mn).

powerW: puissance totale de traction fournie sur une roue (W).

Pertes dans le coffre

Les pertes dans un seul coffre de traction sont désignées par « ModuleLosses » dans CITHEL®. Ces pertes représentent les pertes de commutation et de conduction dans les semi-conducteurs et les pertes dans les filtres.

Pertes dans le transformateur

L'énergie perdue dans le transformateur (Loss_TT) est déduite à partir des autres énergies calculées précédemment. Elle est exprimée par :

$$Loss_TT = E_loss - \int (Loss_M + Loss_gear + 6.ModuleLosses)\, dt \quad (kWh) \tag{II.4}$$

Les pertes dans le transformateur sont la différence entre l'énergie totale perdue dans la chaine de traction et l'intégrale des pertes des autres composants. La chaine contient six coffres donc les pertes du coffre sont multipliées par six dans (II.4).

Tableau II.1 : Les pertes des différents composants du Tram Train calculées par CITHEL® sur le parcours choisi

	W	kWh (u.r.)
Eln	-	1.00
Ew_T (kWh)	-	0.76
Loss_M	**	0.08
Loss_gear	**	0.04
lossModule	**	0.03
Loss_TT	-	0.08

Après avoir déterminé les quantités de matériaux et les énergies consommées par les principaux composants de la chaine de traction, la modélisation environnementale peuvent être lancée avec le logiciel EIME®.

Modélisation de la chaine de traction du Tram Train sur EIME®

La modélisation des différents composants a été faite par le logiciel EIME® v4.0 avec la base de données 10.0. Sur cette version du logiciel, il suffit d'indiquer, avec les quantités des matériaux et les énergies consommées, l'endroit où le produit va rouler pour préciser la provenance de l'électricité consommée par le matériel. En effet, la production de l'électricité est plus ou moins impactante selon le pays de production. Par exemple, en France l'électricité est produite par des centrales nucléaires alors qu'en Europe de l'est, les sources principales de production sont des centrales de fioul ou de charbon qui sont selon le CEA dix fois plus impactants qu'une centrale nucléaire de même puissance.

Le Tram Train est destiné principalement au marché européen donc l'électricité choisie pour la modélisation est l'électricité européenne.

Modélisation du transformateur de traction

- ***Phase de fabrication***

Le bilan massique des matériaux utilisés dans le transformateur de traction (TT) dont un extrait est donné précédemment, a été fourni par le fabricant AREVA. Certains matériaux utilisés ne figurent pas dans la base de données du logiciel EIME® comme l'huile A utilisée pour le refroidissement du transformateur. Pour trouver le meilleur substituant dans la base de données, il faut savoir sa composition chimique, la procédure de fabrication, ses caractéristiques, et les normes environnementales qu'il respecte. Toutefois, il est très difficile de trouver toutes ces informations pour des raisons de confidentialité. Ainsi, dans ce cas, le meilleur substituant est celui qui correspond le mieux aux informations disponibles.

L'huile A est un fluide écologique à base d'esters synthétiques et résistant à l'inflammation. En effet, cette huile a un point de feu élevé (>300°C). Il supporte d'extrêmes variations de température ou de tension, est facilement biodégradable et est classifié sans

danger pour l'eau. Ce fluide manifeste aussi une tolérance à l'humidité beaucoup plus élevée que celle de l'huile minérale ou l'huile silicone liquide. L'huile A est conforme à la directive *RoHS* car il ne contient pas d'ignifuges PBB ou PBDE, et sa formule n'utilise pas de cadmium, mercure ou chrome hexavalent. Les concentrations de ces métaux lourds sont inférieures à 1 ppm [MIDEL®]. Enfin, à la fin de vie, l'huile A est totalement recyclable.

Le matériau le plus proche disponible dans la base de données EIME® v10.0 et qui remplit les caractéristiques environnementales de l'huile A est la résine « Palatal » qui est une résine polyester insaturée [DSM]. Ce produit ne contient pas de métaux lourds, est conforme à la directive *RoHS*, résiste à l'humidité et est totalement recyclable. Ainsi, nous estimons qu'il est le plus proche de l'huile A.

Dans la modélisation du transformateur sur EIME®, nous avons également considéré les procédés de fabrication (découpage des tôles, assemblage des composants, traitement de surface, etc.). Ces procédés sont disponibles dans la base de données d'EIME®.

- ***Phase d'utilisation et maintenance***

Selon les documents techniques du Tram Train, l'appareil va être sous tension 7.5 heures et va rouler pendant 6.8 heures en moyenne par jour sur ses 30 ans de vie.

A partir de la simulation de la chaine du Tram Train sur CITHEL®, on a pu déterminer l'énergie perdue dans le transformateur sur le trajet de mission choisi. Avec toutes ces informations, on a modélisé la phase d'utilisation du TT sur EIME®.

Les étapes et activités de maintenance ont été prises en compte pour les consommations de matériaux. Par exemple, l'huile de refroidissement est remplacée six fois sur la durée de vie de la chaine de traction donc la masse d'huile prise en compte dans la modélisation du transformateur est égale à six fois la masse d'huile contenue dans la cuve.

- ***Phase de distribution***

Pour la phase de distribution, on a pris le cas d'un transformateur fabriqué en France (Petit-Quevilly) et transporté à Valenciennes par des camions poids-lourds.

- ***Fin de vie***

En fin de vie, le transformateur est démonté et ses matériaux sont récupérés et recyclés.

- ***Résultats de modélisation du transformateur***

Les résultats présentés dans la figure II.6 montrent que la phase d'utilisation est la plus impactante sur le cycle de vie du transformateur de traction. Dans cette figure, ***M*** désigne la phase de fabrication, ***D*** la phase de distribution et ***U*** la phase d'utilisation.

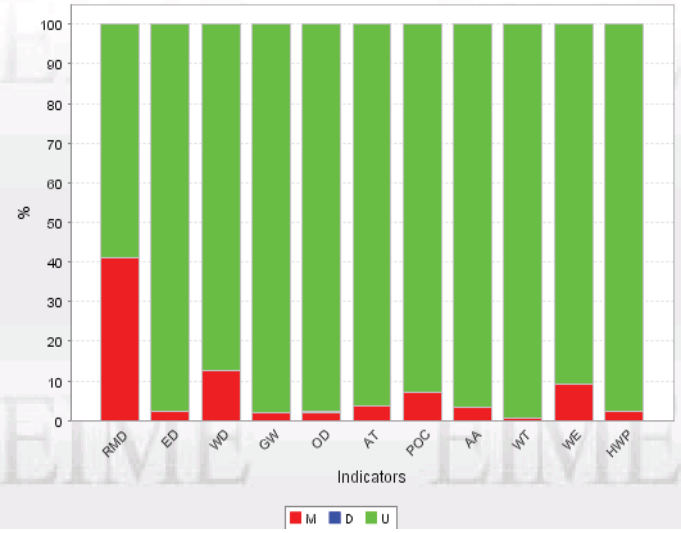


Figure II.6 : Répartition des impacts sur le cycle de vie du transformateur principal du Tram Train

D'autres résultats montrent que le taux de recyclabilité du transformateur et de 98% et qu'il n'y a pas ni matériaux interdit par la directive *RoHS*, ni substances dangereuses à signaler avec cette version d'EIME®. Les valeurs de différents indices d'impacts sont dans le tableau II.2.

Tableau II.2 : indices d'impacts du transformateur de traction

Impacts	EIME®
RMD (Y^{-1})	2.5244^{e}-11
ED (MJ)	1.3582^{e}7
WD (dm^3)	2.3499^{e}6
GW ($g{\sim}CO_2$)	6.9215^{e}8
OD ($g{\sim}CFC_{11}$)	59.631
AT (m^3)	1.3554^{e}11
POC ($g{\sim}C_2H_4$)	2.5346^{e}5
AA ($g{\sim}H^+$)	1.1112^{e}5
WT (dm^3)	1.6574^{e}8
WE ($g{\sim}PO_4$)	2.135^{e}3
HWP (kg)	1.1056^{e}4

- ***Interprétation des résultats***

Ces résultats montrent que le transformateur principal est un gros consommateur d'énergie et de ressources. En effet, sur sa durée de vie, l'impact ED (*energy depletion*) indique que le transformateur consomme l'équivalent de 358000 m^3 de gaz naturel et émet 692 tonnes de CO_2 soit, la consommation en gaz naturel de 451 français et les émissions de CO_2 de 103 français pendant une année.

Le transformateur possède un bon taux de recyclabilité d'environ 98% et il consomme 2.3 tonnes d'huile sur sa durée de vie. Cette huile est totalement recyclable, tout comme l'huile minérale et la silicone liquide. Toutefois, les trois huiles ne possèdent pas les mêmes impacts dans la phase de fabrication car elles n'ont pas la même constitution chimique et n'ont pas la

même procédure de fabrication. Ainsi, le changement d'une huile peut modifier les impacts générés dans la phase de fabrication.

- ***Effet de changement de l'huile sur le cycle de vie du transformateur***

Dans la phase interprétation du cycle de vie du TT, nous avons évoqué que, pour le refroidissement du transformateur de tête du Tram Train, trois types d'huile sont adaptés à cette application. Ce sont, l'huile A, l'huile minérale et l'huile silicone dont les références respectives « huile A », « huile B» et « huile C » sont fournies par notre partenaire ALSTOM TRANSPORT.

L'huile A est déjà décrite pour la modélisation du transformateur sur EIME®. Il reste à modéliser deux nouveaux transformateurs avec les deux autres huiles pour la comparaison.

- ***L'huile B***

Les huiles B sont des huiles polydiméthylsiloxanes et forment une classe importante parmi les huiles silicones commercialisées. Elles sont constituées de chaines moléculaires linéaires, plus au moins longues, dont les éléments sont formés d'atomes de silicium et d'oxygène alternés. Les atomes de silicium sont saturés par des groupements méthyle [**].

Les points forts de ces huiles sont leurs points de feu supérieur à 330 °C et leur stabilité thermique qui permet une utilisation à 160 °C en permanence.

- ***L'huile C***

L'utilisation des huiles minérales dans les matériels électriques remonte pratiquement au début de leur production industrielle. Elles sont utilisées pour l'isolation électrique et le transfert thermique.

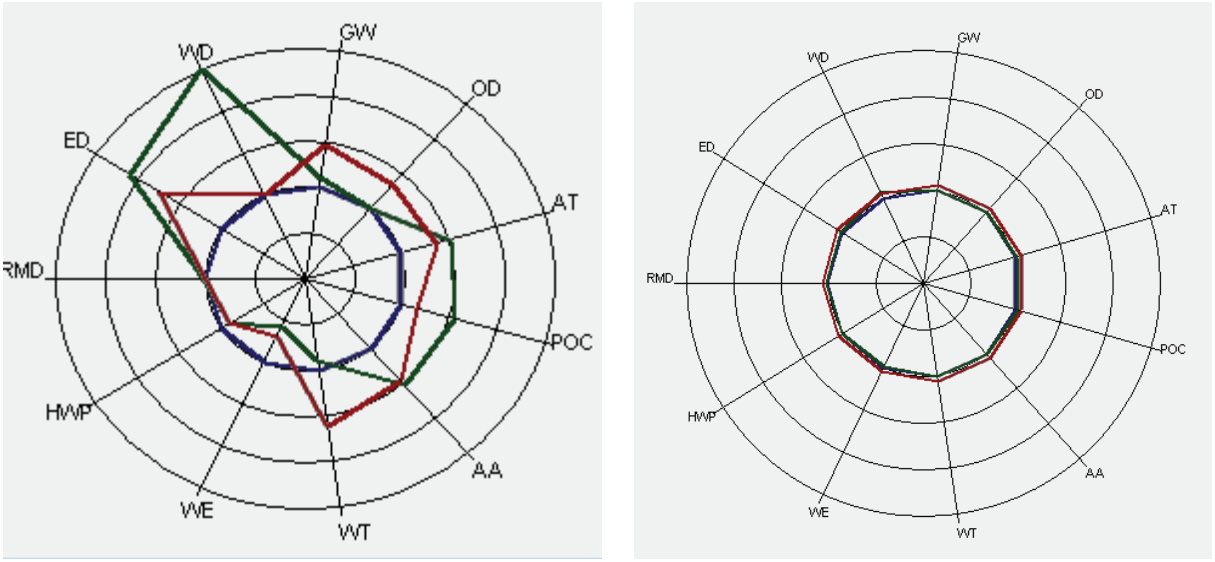
Les caractéristiques thermiques, physiques et chimiques sont déterminées à partir de [**].

- ***Comparaison des huiles***

La comparaison des impacts environnementaux générés par les transformateurs de traction avec les trois huiles sur la phase de fabrication et sur le cycle de vie sont montrés dans les figures II.7.

Le diagramme montré dans la figure II.7 indique que les différentes huiles ne génèrent pas les mêmes impacts dans la phase de fabrication alors que, sur le cycle de vie, le bilan des impacts est le même. En effet, il a été déjà évoqué que les huiles sont obtenues par des procédures différentes et qui ont des origines différentes, ce qui explique les différences des diagrammes sur la phase de fabrication. Cette différence n'est plus visible sur le cycle de vie ce qui est conforme aux résultats de la figure II.6 qui montrent que les impacts générés dans la phase d'utilisation sont dominants. Par conséquent, les différences sur les indices d'impact

dans la phase de fabrication obtenus par le changement d'huile deviennent négligeables sur le cycle de vie car la phase d'utilisation est largement dominante.



Phase de fabrication Cycle de vie

Figure II.7 : Comparaison des effets environnementaux des trois huiles sur la phase de fabrication et sur le cycle de vie du transformateur (bleu : huile C, rouge : huile B et vert : l'huile A)

- ***Pistes d'améliorations***

La phase d'utilisation du transformateur est la phase la plus impactante sur son cycle de vie. Ainsi, la diminution des pertes du transformateur réduira grandement ses impacts environnementaux.

Pour conclure sur l'interprétation des résultats de l'inventaire du transformateur, nous proposons quelques pistes de réduction des impacts de ce composant :

- Une optimisation bi-objectif (masse, pertes) des paramètres géométriques : L'algorithme d'optimisation agit sur les paramètres de conception sans toucher aux matériaux qui le constituent.
- Substitution de matériau. Par exemple : changer l'enroulement en aluminium par un enroulement en cuivre qui possède une meilleure conductivité. Pour que la comparaison des matériaux soit pertinente, chaque substitution de matériau doit s'accompagner d'une optimisation bi-objectif sur les paramètres géométriques.

Modélisation du coffre de traction

- ***Phase de fabrication***

La liste des matériaux du coffre du Tram Train est fournie par ALSTOM TRANSPORT. Un extrait de ces matériaux est montré au début de ce chapitre.

Les différents matériaux qui n'existent pas dans la base de données du logiciel EIME® dont un extrait est donné dans le tableau II.3, ont été remplacés par d'autres dont les

caractéristiques sont très proches comme nous l'avons expliqué pour l'ester Midel®. Les alliages dont la constitution est composée par plusieurs matériaux ont été modélisés par leurs matériaux de bases avec les proportions convenables. Par exemple, un alliage de laiton est modélisé par 60% de sa masse par le cuivre et 40% de sa masse en nickel.

Tableau II.3 : un extrait de matériaux substitués dans le coffre de traction du Tram Train

Matériaux utilisés	Matériaux substituants
Supprimé pour des raisons de confidentialité	

- ***Phase d'utilisation et maintenance***

La simulation de la chaine de traction sur le parcours choisi avec CITHEL® a montré que l'énergie perdue dans le coffre est de 0.03 (u.r.). La répartition de ces pertes dans les différents composants du coffre est montrée dans la figure II.8.

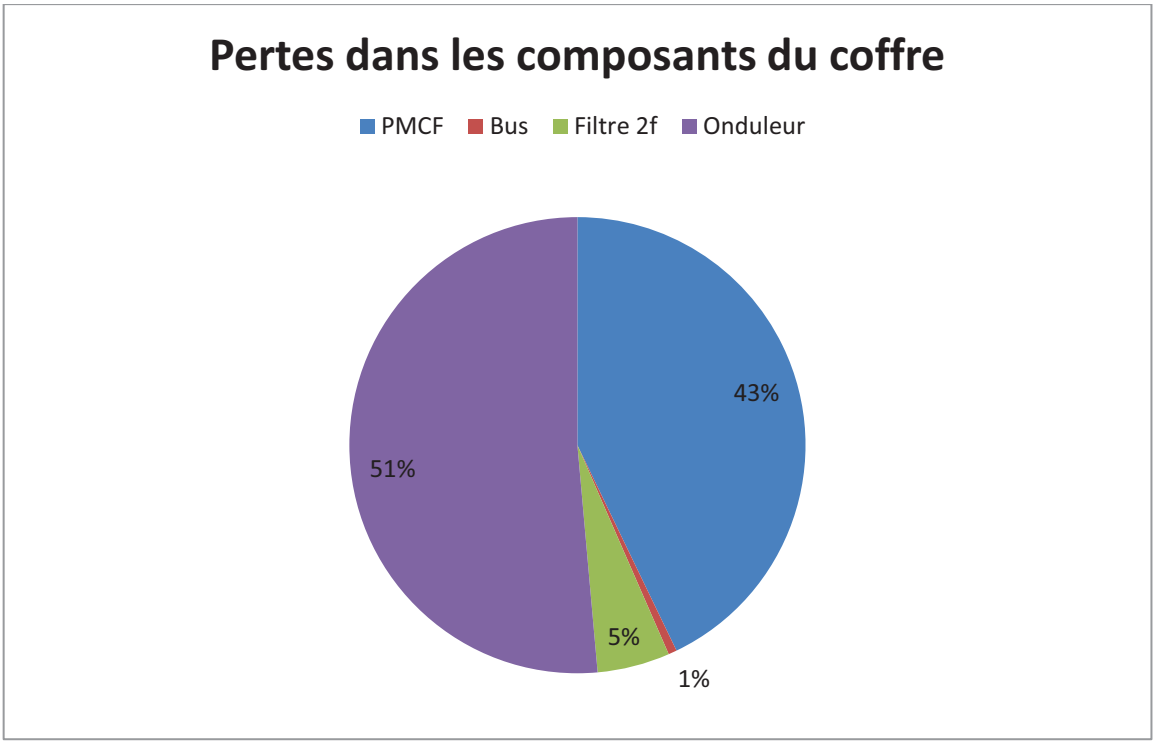


Figure II.8 : Répartition des pertes dans le coffre de traction

La majorité des pertes électriques sont dues aux pertes (de commutation et de conduction) dans les IGBT du redresseur (appelé aussi pont monophasé à commutation forcée, PMCF) et ceux de l'onduleur.

Concernant la maintenance, les différents fabricants des composants du coffre ont assuré que leurs composants ont été conçus pour avoir une durée de vie égale à celle de la chaine de traction.

- ***Phase de distribution***

Pour cette phase du cycle de vie, nous allons nous intéresser aux principaux composants du coffre :

- Les bobines de filtrage fabriqué en France.
- Les packs d'IGBT sont transportés du Japon par des avions jusqu'en Allemagne puis par des camions poids-lourds jusqu'à Tarbes.
- Les condensateurs sont supposés transportés des Etats-Unis par avion.

- ***Fin de vie***

En fin de vie, le coffre est démantelé et ses composants sont triés. Les composants dont les matériaux sont recyclables sont démantelés et les autres sont broyés ou traités.

- ***Résultats de la modélisation du coffre***

Les valeurs de différents impacts calculés par EIME® sont montrées dans le tableau II.4 et la contribution des différentes phases du cycle de vie dans les différents impacts est montrée dans la figure II.9. Le taux de recyclabilité du coffre est d'environ 80%.

EIME® alerte de la présence du plomb dans certains composants du coffre comme les condensateurs, les capteurs, les IGBT et les filtres CEM. Ce plomb provient du matériau utilisé dans la soudure.

Tableau II.4 : Les impacts calculés par EIME® pour un coffre de traction du Tram Train

Impacts	EIME
RMD (Y^{-1})	2.325^{e}-11
ED (MJ)	4.2179^{e}6
WD (dm^3)	6.9143^{e}5
GW ($g{\sim}CO_2$)	2.21678^{e}8
OD ($g{\sim}CFC_{11}$)	18.334
AT (m^3)	4.4388^{e}10
POC ($g{\sim}C_2H_4$)	8.4945^{e}4
AA ($g{\sim}H^+$)	3.5928^{e}4
WT (dm^3)	4.9873^{e}7
WE ($g{\sim}PO_4$)	1.8028^{e}3
HWP (kg)	3.7759^{e}3

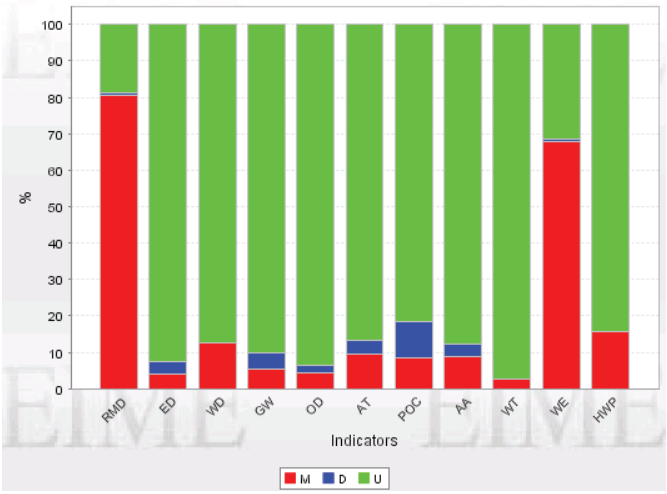


Figure II.9 : Répartition des impacts sur le cycle de vie des 6 coffres de traction du Tram Train

- ***Interprétation des résultats***

Les indices d'impacts d'épuisement des ressources (RMD) et d'eutrophisation de l'eau (WE) dans la phase de fabrication sont les plus élevés dans le cas du coffre. Pour les autres impacts, c'est la phase de fabrication qui est la plus impactante.

La hausse de l'indice relié à l'impact RMD est due principalement à l'utilisation des matériaux dont les réserves sont très limitées dans le coffre, dont nous citons par exemple, le nickel, le zinc, l'étain, etc. Quant à la hausse de l'indice relié à l'impact WE, elle est due à l'utilisation du nickel dans les alliages de laiton. En effet, la fonctionnalité de suivi d'impact offerte par EIME® a permis de déterminer que le nickel est la source principale de contribution à l'eutrophisation de l'eau.

Dans le coffre, le plomb est utilisé dans la soudure de certains composants et sous composants. La directive *RoHS* autorise une quantité de plomb qui ne dépasse pas 0.05% de la masse du composant mais apparemment cette directive n'est pas applicable au domaine ferroviaire.

Pour terminer la phase d'interprétation du coffre, nous proposons certaines pistes d'amélioration sa performance environnementale.

- ***Pistes d'améliorations***

La diminution des pertes de commutation dans les composants semi-conducteurs permettrait de réduire les impacts environnementaux du coffre durant sa phase d'utilisation. La réduction de ces pertes peut se faire en agissant sur la fréquence de commutation des IGBT.

L'analyse de l'indice d'impact WE avec EIME® a montré que le nickel et le zinc sont les principaux acteurs dans la hausse de cet indice. La substitution des alliages de laiton et de ferrites par du cuivre par exemple peut réduire les impacts du coffre pendant sa phase de fabrication.

Modélisation du moteur de traction

- ***Phase de fabrication***

Tous les matériaux utilisés dans la fabrication du moteur existent déjà dans la base de données d'EIME® à l'exception des aimants qui ont été substitués par des aimants de type AlNiCo. Malgré la différence dans la constitution chimique des aimants, nous n'avons pas ici de choix car ce type d'aimant est le seul disponible dans cette version de la base de données du logiciel EIME®. Nous tiendrons compte de cette substitution dans la phase d'interprétation des résultats.

- ***Phase de distribution***

Le moteur de traction est fabriqué à Ornans est transféré à Valenciennes par des camions poids-lourds.

- ***Phase d'utilisation et maintenance***

L'énergie consommée par les pertes dans les 6 moteurs de traction est calculées par CITHEL®.

Pour les moteurs de traction nous avons considéré que les matériaux et énergies consommés par les activités de maintenance n'ont pas une influence remarquable sur l'ACV. En effet, le moteur est conçu pour durer pendant la phase d'utilisation de la chaine de traction.

- ***Fin de vie***

Le cuivre, l'aluminium et les tôles magnétiques sont les principaux matériaux qui constituent le moteur. Ces matériaux sont récupérés par démantèlement en fin de vie du moteur pour être recyclé.

- ***Résultats de modélisation du moteur***

Les résultats de modélisation du moteur sur EIME® sont donnés dans la figure II.10 et le tableau II.5. Le moteur présente un taux de recyclabilité d'environ 80% et il n'y a pas de matériaux dangereux.

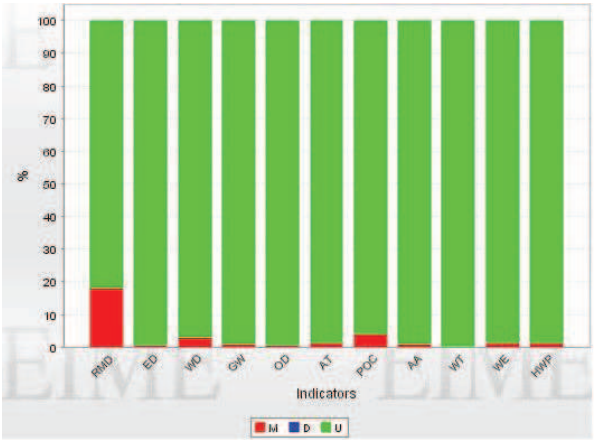


Figure II.10 : Répartition des impacts sur le cycle de vie du moteur de traction du Tram Train

Tableau II.5: Les impacts calculés par EIME pour un moteur de traction du Tram Train

Impacts	EIME
RMD (Y^{-1})	4.772^{e}-12
ED (MJ)	3.80^{e}6
WD (dm^3)	5.5518^{e}5
GW ($g{\sim}CO_2$)	1.8019^{e}8
OD ($g{\sim}CFC_{11}$)	15.457
AT (m^3)	3.48^{e}10
POC ($g{\sim}C_2H_4$)	6.4425^{e}4
AA ($g{\sim}H^+$)	2.8513^{e}4
WT (dm^3)	4.3382^{e}7
WE ($g{\sim}PO_4$)	5.1573^{e}2
HWP (kg)	2.8732^{e}3

- ***Interprétation des résultats***

La phase d'utilisation du moteur est la phase la plus impactante sur son cycle de vie. Cela est dû à ses pertes importantes. Ainsi, une amélioration du rendement de ce composant améliorerait sa performance environnementale.

II.2.3. Conclusion sur l'ACV de la chaine de traction

Les informations que nous avons recueillies ont permis une modélisation environnementale de la chaine de traction avec une bonne précision. En effet, la majorité des matériaux utilisés dans cette chaine ainsi que leurs processus de fabrication sont disponibles dans la base de données d'EIME®.

Les résultats de modélisation sont présentés sous 11 impacts qui représentent les critères environnementaux de l'optimisation mais il est souvent souhaitable d'avoir un nombre réduit de critères tant pour le bon fonctionnement des algorithmes d'optimisation que pour la représentation de l'ensemble des solutions optimales et la prise de décision qui en découle.

Dans la littérature [CON-08], [DEB-07], les impacts de réchauffement climatique (GW) et d'énergie sur cycle de vie (W_{LCA} représenté ici par ED) ont été choisis comme des critères environnementaux dans l'optimisation. Cependant, dans [JOL-05] il est indiqué que le choix d'un seul impact peut ne pas aboutir à une solution satisfaisante ou parfois plus polluante. En effet, la réduction d'un seul impact sur une phase de cycle de vie ou sur le cycle de vie peut engendrer l'augmentation d'un autre impact sur la même phase ou sur une autre phase du cycle. C'est ce qu'on appelle un transfert de pollution.

Pour prendre en compte le maximum d'impacts dans l'optimisation, nous avons pensé à utiliser une méthode d'agrégation des impacts [RBA-10].

II.3. Méthodes d'agrégation des impacts

Les méthodes d'agrégation d'impacts les plus connues sont citées dans le premier chapitre. Chaque méthode a une stratégie différente des autres pour calculer un indicateur environnemental. Impact 2002+ est parmi les meilleures méthodes car :

- Elle est la méthode la plus récente et elle respecte les démarches indiquées dans la dernière version de la norme ISO 14044.
- Elle permet l'agrégation des 11 impacts estimés par EIME® pour calculer un seul indicateur.
- La méthode est simple à utiliser.

Cette méthode est détaillée dans [JOL-03]. L'indicateur environnemental est obtenu en pondérant les quatre catégories de dommages qui sont le changement climatique, les dommages sur l'écosystème, les dommages sur la santé humaine, et les dommages sur les ressources, comme montré en figure II.11.

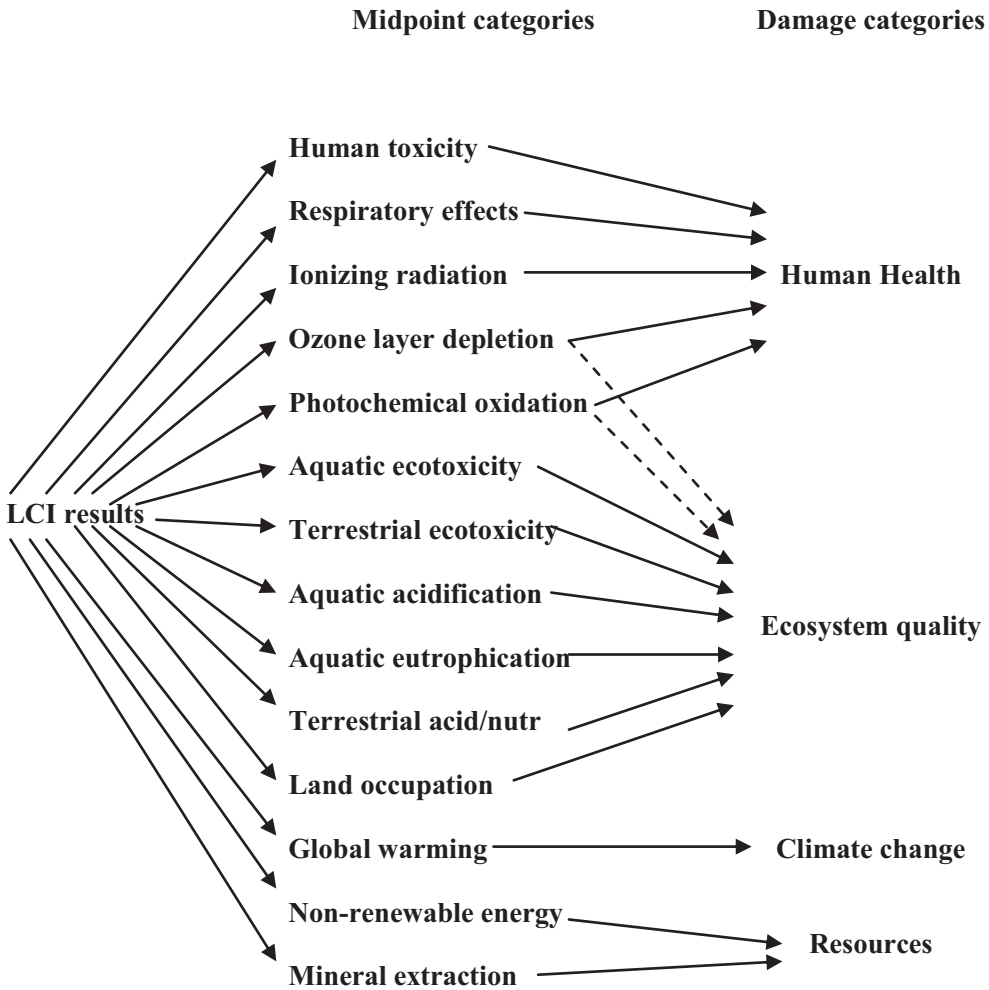


Figure II.11 : Les catégories intermédiaires et les catégories de dommages de la méthode impact 2002+

Chaque catégorie de dommage est une agrégation d'impacts. Dans notre étude ces impacts sont ceux calculés par EIME®. L'agrégation est assurée par les équations (II.5) à (II.9).

$$EI = \frac{2}{7}(NGW + NDECO + NDHH) + \frac{1}{7}NDR \quad \text{(II.5)}$$

où NGW, NDECO, NDHH et NDR sont respectivement les valeurs de dommage normalisées pour les indicateurs de réchauffement climatique, de destruction de l'écosystème, de dommage sur la santé humaine et d'amoindrissement des ressources qui sont calculées par :

$$NDHH = C_{nd_poc} . POC + C_{nd_od} . OD \quad \text{(II.6)}$$

$$NDECO = C_{nd_wt} . WT + C_{nd_aa} . AA + C_{nd_at} . AT \quad \text{(II.7)}$$

$$NGW = C_{nd_gw} . GW \quad \text{(II.8)}$$

$$NDR = C_{nd_rmd} . RMD + C_{nd_ed} . ED \quad \text{(II.9)}$$

Les C_{nd_i} présentent les coefficients normalisés des dommages pour l'impact *i*. Ces coefficients sont spécifiques à la méthode impact 2002+ et leurs différentes valeurs sont données dans le tableau II.6.

Tableau II.6 : Les valeurs des coefficients d'impacts de la méthode impact 2002+

Coefficients	Valeurs
C_{nd-poc}	3.1324e-004
C_{nd-od}	0.1544
C_{nd-wt}	3.6642e-009
C_{nd-at}	5.6712e-006
C_{nd-gw}	4.8978e-004
C_{nd-rmd}	6.5789e-006
C_{nd-aa}	4.8978e-004
C_{nd-ed}	6.5789e-006

Pour certains impacts, il est nécessaire de les convertir aux unités utilisées par la méthode d'agrégation. Par exemple, dans le cas de l'impact AA qui est calculé par EIME® en gramme équivalent de H^+, il doit être converti en kilogramme d'oxyde de nitrogène NO_2 pour qu'il soit utilisable par impact 2002+. Le coefficient de conversion $kg(NO_2)/g(H^+)$ peut être obtenu facilement grâce à EIME®.

L'agrégation des impacts calculés avec la méthode impact 2002+ permet d'obtenir un seul indicateur nommé EI (cf. figure II.11) qui va simplifier énormément le problème d'optimisation en réduisant le nombre d'objectifs. Ainsi, on obtient un problème

d'optimisation bi-objectif (masse, EI) au lieu d'un problème d'optimisation avec 12 objectifs (masse, 11 impacts environnementaux).

II.4. Interprétation des résultats

Les composants de la chaine de traction étudiée sont le transformateur, les coffres et les moteurs de traction. Les résultats de l'analyse de cycle de vie de chaque composant montrent qu'il y a des pistes intéressantes pour améliorer sa performance environnementale. L'amélioration de la performance environnementale d'un composant ne doit pas dégrader la performance environnementale d'un autre pour s'assurer que la performance environnementale de la chaine est améliorée.

Dans la suite, nous présentons un bilan des études environnementales faites précédemment sur les composants de la chaine. Nous commençons d'abord par une comparaison des pertes, des indices d'impacts et des masses des trois composants dans les figures II.12 à II.16.

Il était prévisible que le transformateur soit le composant le plus impactant dans cette chaine de traction car c'est le composant qui représente les pertes et la masse les plus importantes (cf. Figure II.12 et II.13). En seconde place, on trouve les moteurs de traction et en dernière place les coffres de traction.

Cette prévision parait juste dans la figure II.16 pour tous les indicateurs environnementaux sauf pour l'impact RMD dans la figure II.14 car les coffres de traction consomment des matériaux dont les réserves naturelles sont moins importantes que celles des matériaux utilisés dans les moteurs et le transformateur. En effet, les matériaux dominants dans les moteurs et le transformateur sont l'acier magnétique, l'aluminium et le cuivre par contre la majorité des composants utilisés dans les coffres sont des alliages de nickel, de zinc et de cuivre, ce qui explique la grande contribution des coffres à l'indicateur RMD par rapport à ceux des moteurs et du transformateur.

Les contributions inattendues des moteurs et des coffres à l'impact WE montrées dans la figure II.15 peuvent être expliquées par les faits suivants :

- Les supports des filtres CEM dans les coffres de traction sont des alliages de ferrite contenant du nickel qui contribue pour 86% dans l'indicateur WE du coffre et d'environ 14% dans celui de toute la chaine, ce qui explique l'ampleur de la contribution des coffres de traction à l'impact WE.
- La base de données d'EIME® ne contient pas les aimants utilisés dans les moteurs et la substitution a alors été faite par l'unique type d'aimant disponible dans cette base de données dont la composition chimique est différente (AlNiCo). Cette composition chimique fait apparaitre l'utilisation du nickel dans les aimants or nous avons vu dans l'étude des coffres de traction que ce matériau fait gonfler remarquablement l'indice de l'impact WE. L'évaluation de cet impact est donc à prendre avec précaution.

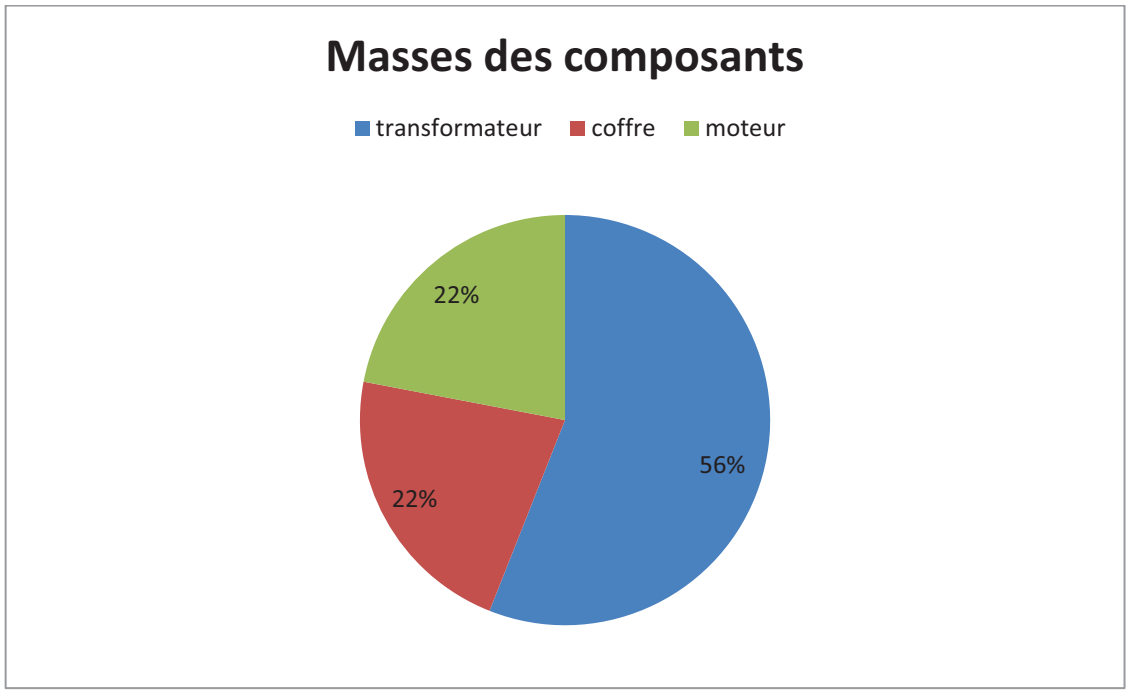


Figure II.12 : Comparaisons des différentes masses des principaux composants électriques de la chaine de traction

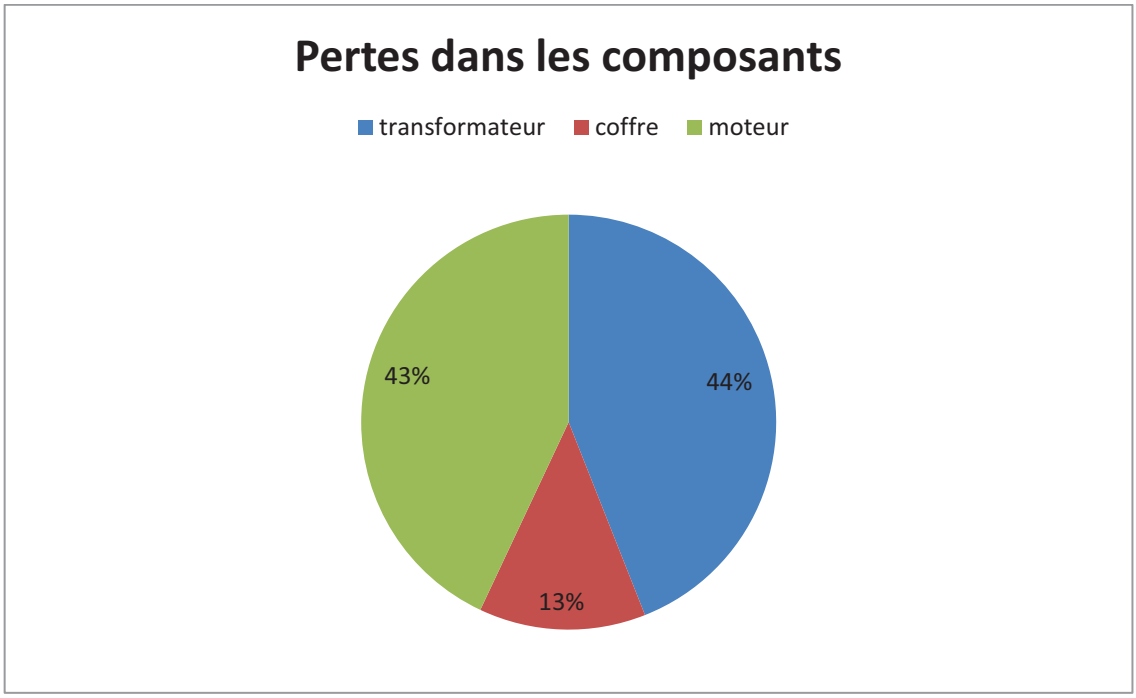


Figure II.13 : Comparaisons des différentes pertes électriques dans les principaux composants électriques de la chaine de traction

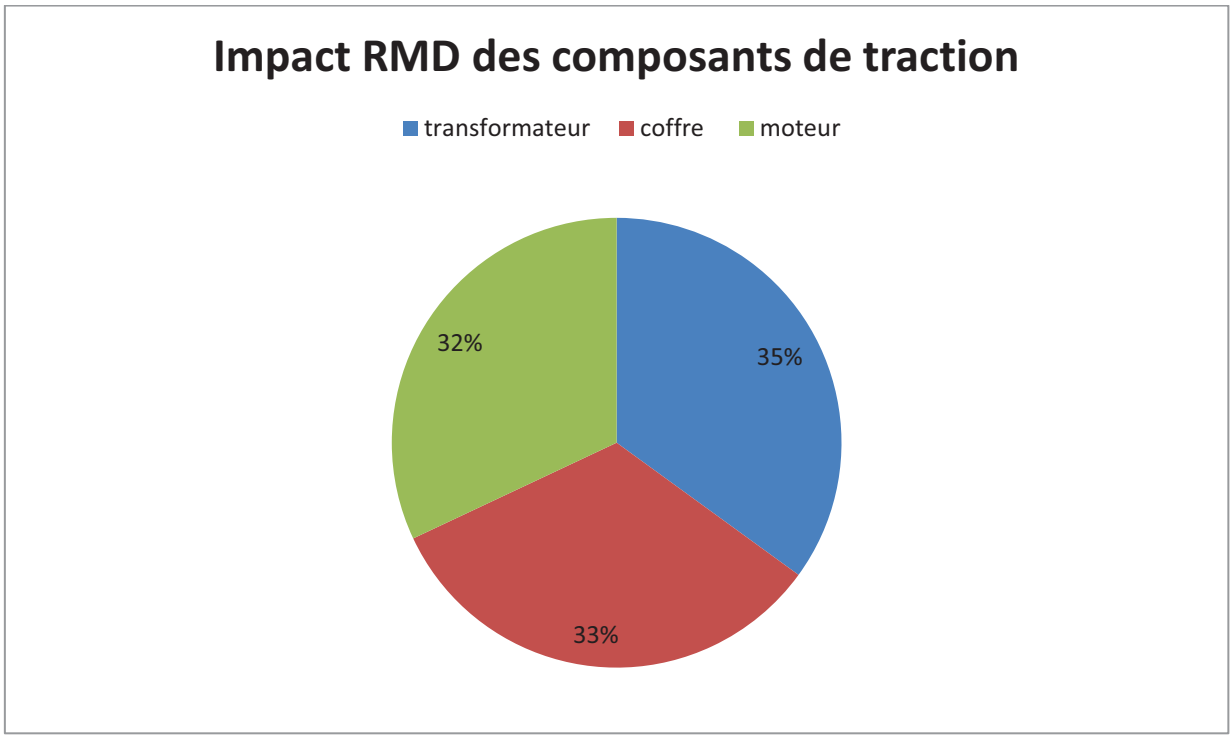


Figure II.14 : Comparaison des indices d'impact RMD des principaux composants électriques de la chaine de traction

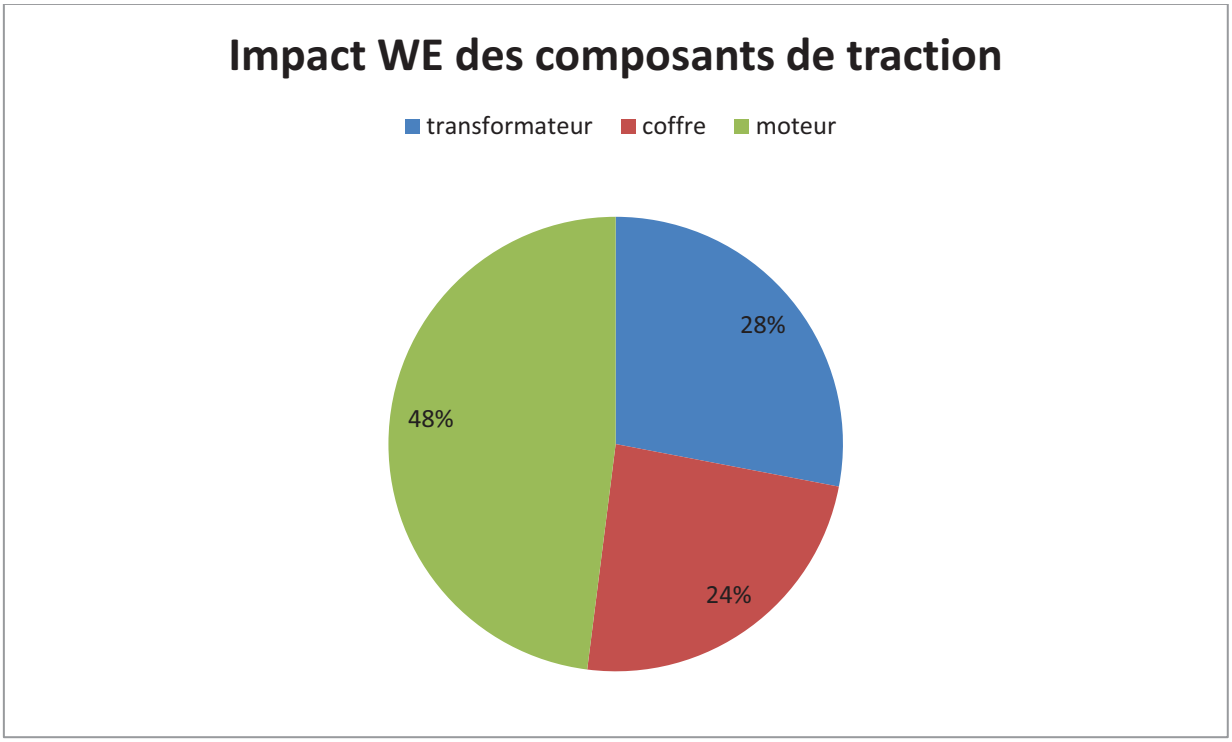


Figure II.15: Comparaison des indices d'impact WE des principaux composants électriques de la chaine de traction

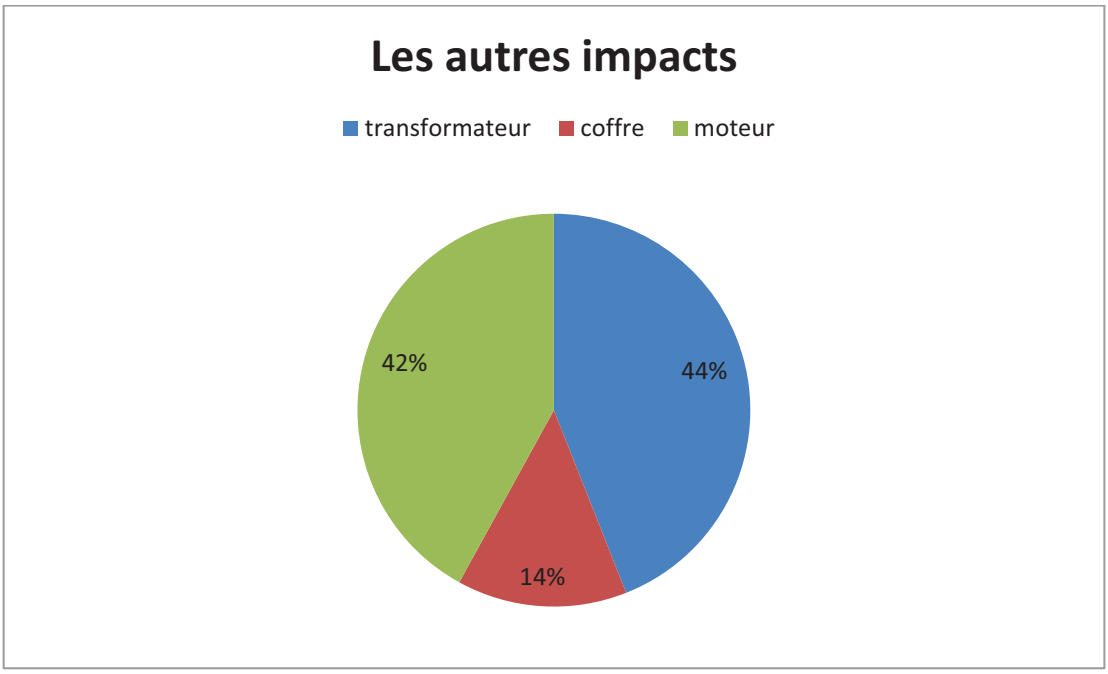


Figure II.16 : Comparaisons des autres indices d'impacts des principaux composants électriques de la chaine de traction

A titre de comparaison, l'impact WE est calculé dans la figure II.17 en éliminant la contribution des aimants à cet impact. On constate que, dans ce cas et conformément à notre prévision, le transformateur a la plus forte contribution à l'impact WE.

La substitution d'aimant peut avoir une influence significative sur la répartition de l'impact RMD (car les vrais aimants contiennent peut-être plus de cobalt dont les réserves sont très faibles dans la nature) mais pas sur les autres indices d'impact car la phase d'utilisation reste dominante.

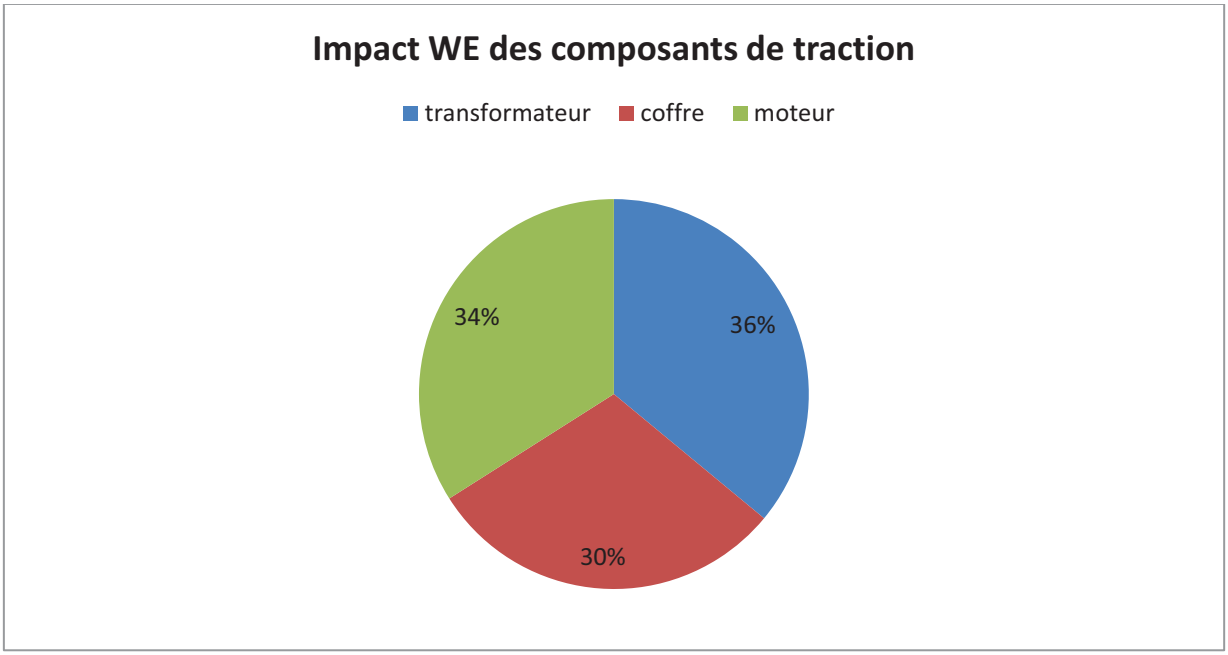


Figure II.17 : Répartition de l'indice d'impact WE pour les principaux composants de la chaine de traction du Tram Train en retirant la contribution des aimants du moteur

II.5. Conclusion

L'ACV est une démarche intéressante pour introduire les impacts environnementaux d'un produit dans sa phase de conception. L'avantage d'utiliser une méthode d'agrégation simplifie le problème d'optimisation et permet d'obtenir une représentation des résultats qui facilite la prise de décision.

L'ACV de la chaine de traction du Tram Train a montré que le transformateur contribue à 44% des impacts de la chaine. Ainsi, l'amélioration de la performance environnementale du transformateur améliora celle de la chaine. Cependant, le transformateur ne peut pas être étudié seul car il est directement relié au pont monophasé à commutation forcée (PMCF) qui génère des harmoniques qui contribuent pour environ 30% aux pertes du transformateur actuel. Les fréquences de ces harmoniques dépendent de la fréquence de commutation des IGBT dans le PMCF et notre but est de trouver la configuration du transformateur et la fréquence de commutation des IGBT qui conduiront à une chaine de traction optimale c.-à-d. ayant les meilleures performances environnementales.

Pour trouver la chaine de traction optimale, nous avons proposé d'exploiter les outils d'optimisation pour obtenir la configuration optimale du transformateur et la fréquence optimale de commutation dans le PMCF. Les algorithmes d'optimisation choisis doivent être capables de gérer toutes les difficultés rencontrées lors de l'éco-conception telles que l'utilisation des modèles éléments finis dont l'évaluation est souvent très lente et qui sont très sensible au bruit numérique, les interactions entre les disciplines, des critères d'optimisation contradictoires et des variables non-classables en cas de substitutions de matériaux par exemple.

Dans le chapitre suivant, des outils et des algorithmes d'optimisation sont présentés et adaptés pour répondre aux besoins de l'éco-conception des composants ferroviaires.

III. Chapitre 3 : Besoin de l'éco-conception en optimisation

III.1. Introduction

L'ACV réalisée dans le chapitre précédent a montré qu'il y a des pistes intéressantes pour améliorer la performance environnementale de la chaine de traction du Tram Train. Parmi ces pistes, il y en a une qui consiste en la réduction des pertes du transformateur de traction (TT) et du redresseur d'entrée, nommée aussi Pont Monophasé à Commutation Forcée (PMCF).

L'exploitation de cette piste aboutira certainement à un TT ayant une meilleure performance énergétique et par conséquent plus cher. Or, la maitrise du coût est primordiale dans l'éco-conception. Pour résoudre ce conflit entre les deux objectifs, nous avons traduit le problème d'éco-conception en un problème d'optimisation bi-objectif.

Pour ce faire, nous devons élaborer les modèles nécessaires des deux composants qui permettent de calculer les objectifs et les contraintes qui assurent leur bon fonctionnement. Comme indiqué en première partie, les modèles développés pour des composants ferroviaires sont de trois types. On trouve dans la littérature des modèles éléments finis [WIL-08], analytiques [AKL-08] et à constantes localisées [BRA-10]. Pour ces différents types de modèle, il faut sélectionner les algorithmes d'optimisation adaptés car algorithme et modèle doivent être en adéquation.

Les algorithmes d'optimisation existants [BRI-07] ne sont pas toujours bien adaptés pour répondre à trois besoins spécifiques de l'éco-conception qui sont :

- La substitution d'un matériau par un autre dans un composant pour réduire ses impacts environnementaux sur son cycle de vie.
- L'utilisation des modèles éléments finis pour certains composants. En effet, ces modèles ont un temps de calcul très élevé et introduisent un bruit numérique qui peut être dommageable à l'algorithme d'optimisation.
- L'implication de différentes disciplines (thermique, magnétique, etc.,) dans la modélisation d'un seul composant.

Confrontés à ces besoins, les outils de l'optimisation doivent répondre à des fonctionnalités particulières dont nous citons :

- Traiter des problèmes d'optimisation bi-objectifs avec des variables continues et discrètes.
- Résoudre une optimisation avec des modèles élément finis dans un temps réduit et avec une précision importante.
- Gérer les interactions entre différentes disciplines pour assurer la consistance des modèles.

Dans ce chapitre nous présentons les outils de l'optimisation qui peuvent assurer les fonctionnalités citées et nous évoquons également les améliorations que nous avons apportées à certains algorithmes pour qu'ils soient plus efficaces pour traiter des problèmes d'éco-conception.

Les différents outils exploités ou adaptés sont testés sur deux benchmarks trouvés dans la littérature. Le premier est l'optimisation d'un transformateur monophasé, fait intervenir les deux disciplines thermique et électrique [TRA-07] et utilise des modèles de différents types:

- Un modèle analytique bâti avec les hypothèses suivantes : la distribution de l'induction magnétique dans le noyau est uniforme, la chute de tension due au courant magnétisant est négligeable et les lignes de champ magnétique sont verticales dans la bobine.
- Un modèle EF 3D qui regroupe trois sous-modèles : deux sous-modèles électromagnétiques à vide et en charge et un sous-modèle thermique en charge. Le couplage entre les différents sous-modèles est faible car il est résolu par la méthode du point fixe.

Le deuxième benchmark est le problème d'optimisation d'un système de stockage de l'énergie magnétique (SMES) dont le dispositif est modélisation par la méthode des éléments finis en deux dimensions (2D). Ce benchmark a été élaboré pour tester les algorithmes d'optimisation [ALL-96].

Ces deux benchmarks sont idéaux pour tester les algorithmes d'optimisation que nous avons retenus pour l'éco-conception des composants ferroviaires. En effet, la modélisation de ce type de composants implique aussi plusieurs disciplines et peut se faire également par plusieurs outils comme les modèles numériques (EF), ou des modèles analytiques basés sur des hypothèses et des équations simplifiées des lois de la physique.

III.2. Optimisation multidisciplinaires

Le transformateur de traction (TT) est un système compliqué qui implique les disciplines magnétique, électrique, thermique, mécanique des fluides, vieillissement et environnementale qui seront détaillées dans le chapitre suivant. Chaque discipline est représentée par un sous-modèle et tous les sous-modèles sont interconnectés pour former le modèle complet du TT. Parmi ces interconnections, nous citons par exemple celle entre les sous-modèles électromagnétique et thermique. En effet, le sous-modèle thermique a besoin des pertes dans les parties actives du TT pour calculer leurs températures et le sous-modèle électrique a besoin de ces températures pour calculer les pertes.

Pour gérer ces interdépendances entre disciplines, l'optimisation multidisciplinaire (*Multidisciplinary Design Optimization*, MDO) [KRE-09] offre trois formulations mono-niveau qui peuvent être exploitées pour concevoir un problème d'optimisation.

III.2.1. Multidisciplinary feasibility

C'est la façon la plus simple pour formuler un problème d'optimisation [ALE-99]. En effet, le problème des interactions entre disciplines est résolu à l'intérieur du modèle et se fait donc indépendamment du problème d'optimisation par une technique numérique (point fixe, quasi-Newton, etc.,). Le modèle multidisciplinaire ainsi obtenu est consistant et peut fournir

des résultats exacts. Avec cette formulation, le problème d'optimisation est inchangé et les variables et contraintes sont celles définies dans le problème de conception.
Le calcul distribué du modèle n'est pas possible avec cette formulation car les sous modèles sont exécutés séquentiellement.
Le problème d'optimisation est exprimé généralement comme suit:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} \quad & f(\mathbf{x}) \\ s.t. \quad & \begin{cases} g(\mathbf{x}) \le 0 \\ h(\mathbf{x}) = 0 \end{cases} \end{aligned} \tag{III.1}$$

Le processus d'optimisation avec une formulation MDF est montré dans la figure III.1.

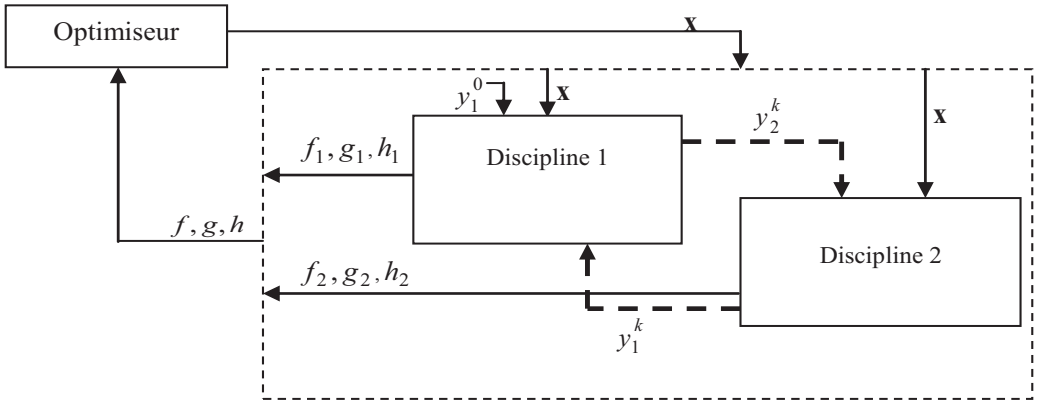


Figure III.1 : Structure du problème d'optimisation avec la formulation MDF

où x sont les variables globales intervenant aussi dans la formulation du problème d'optimisation et y sont les variables partagées entre modèles.

III.2.2. Individual Disciplinary Feasibility

La formulation *Individual Disciplinary Feasibility* (IDF) permet de découpler les modèles du système [CRA-94] grâce à un vecteur de variables d'optimisation additionnelles. Ces variables additionnelles représentent les entrées nécessaires pour que chaque discipline puisse être évaluée indépendamment des autres et ces variables additionnelles sont estimées par l'optimiseur à chaque évaluation des sous-modèles. La consistance des modèles est assurée par des contraintes d'égalité supplémentaires dans le problème d'optimisation et qui imposent que les valeurs estimées sont égales aux valeurs en sorties des sous-modèles. Par conséquent, avec cette formulation, il n'a y plus d'interaction entre les différentes disciplines à résoudre lors de la modélisation. Autrement dit, avec la formulation IDF ; l'optimiseur résout le problème de consistance des sous-modèles et le problème d'optimisation simultanément à l'aide des variables et contraintes additionnelles. Ceci complique davantage le problème d'optimisation par rapport à la formulation MDF mais, par contre, réduit souvent le temps de résolution. De plus, il est possible de distribuer le calcul des sous-modèles sur plusieurs calculateurs. Le vecteur des variables additionnelles est noté y' dans la figure III.2 qui montre la structure du problème d'optimisation avec la formulation IDF.

Pour cette formulation le problème d'optimisation est décrit par :

$$\begin{aligned} \min_{x,y'} \quad & f(x,y') \\ s.t. \quad & \begin{cases} g(x,y') \le 0 \\ h(x,y') = 0 \\ y - y' = 0 \end{cases} \end{aligned} \tag{III.2}$$

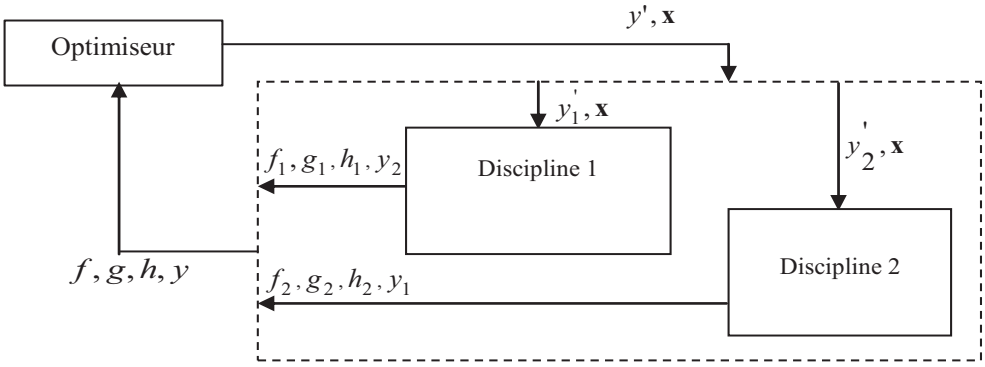


Figure III.2 : Structure du problème d'optimisation avec la formulation IDF

III.2.3. All At Once

Cette formulation, qui est assez semblable à IDF, consiste à retirer les équations des sous-modèles pour les incorporer dans le problème d'optimisation sous forme de contraintes égalité. Ainsi, dans cette formulation, les variables additionnelles sont des inconnues notées *u* alors que les contraintes égalité additionnelles, notées *r*, sont les résidus des équations qui doivent être égaux à zéro pour que le système soit consistant.

Le problème d'optimisation est décrit par :

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x,u) \\ s.t. \quad & \begin{cases} g(x,u) \le 0 \\ h(x,u) = 0 \\ r(x,u) = 0 \end{cases} \end{aligned} \tag{III.3}$$

La Structure du problème d'optimisation avec la formulation AAO est montrée dans la figure III.3.

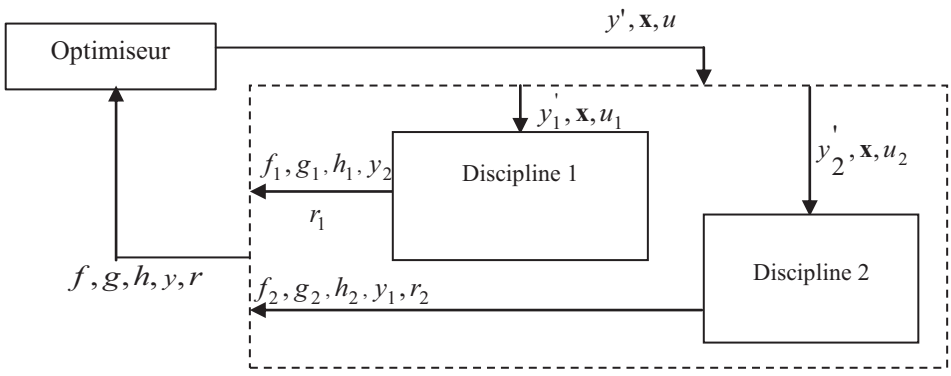


Figure III.3 : Structure du problème d'optimisation avec la formulation AAO

III.2.4. Comparaison des formulations MDO

Nous souhaitons dans cette partie déterminer la ou les formulations MDO les plus adaptées pour structurer un problème d'optimisation comme celui des composants ferroviaires. Pour ce faire, nous avons proposé d'exploiter le modèle analytique du transformateur monophasé [TRAN] pour tester les différentes formulations.

Modèle analytique multidisciplinaire du transformateur

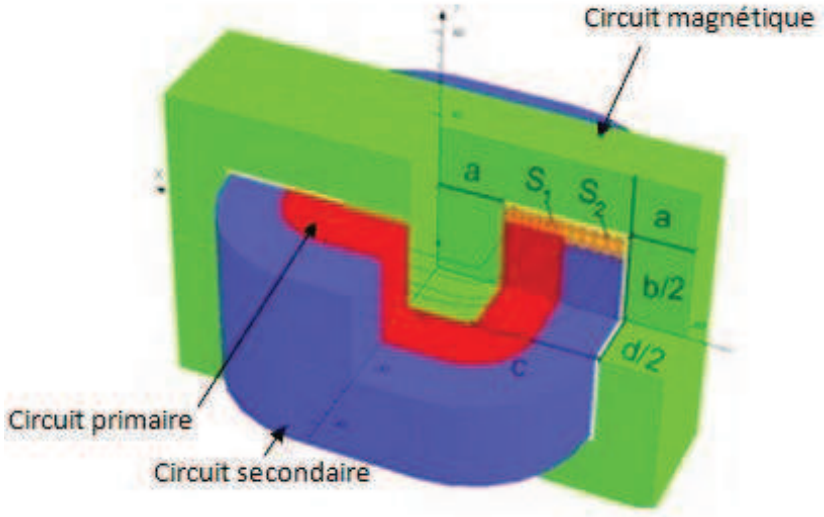


Figure III.4 : Variables d'optimisation du transformateur monophasé

Le transformateur étudié est montré dans la figure III.4. Ses caractéristiques et ses modèles magnétique et thermique sont disponibles sur le site du L2EP [TRAN] et dans [TRA-07]. Les interactions entre les deux sous-modèles électromagnétique et thermique sont traduites par un système implicite de 8 équations dont la résolution vient compliquer davantage le problème d'optimisation. Pour surmonter ce problème, l'auteur a choisi de résoudre le système implicite par une méthode quasi-Newton à l'intérieur du modèle et indépendamment du problème d'optimisation ce qui implique un couplage fort entre les sous-modèles du transformateur.

La Figure III.5 montre le modèle complet du transformateur monophasé utilisé par T.V. Tran dans [TRAN] et [TRA-09]. Un couplage fort entre les sous-modèles a été choisi.

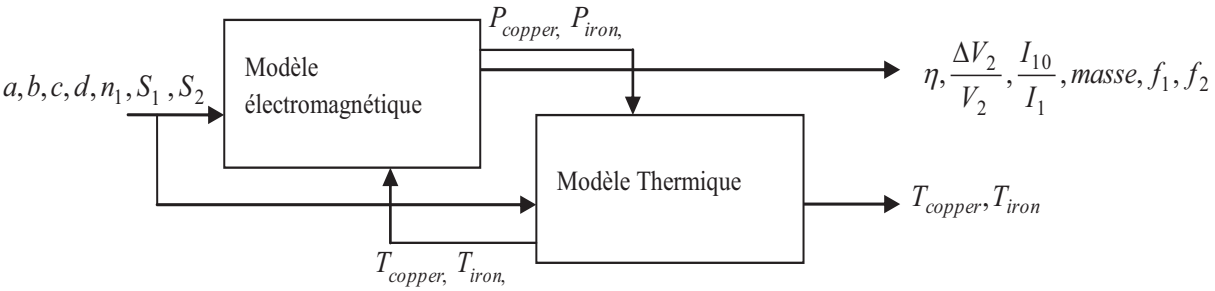


Figure III.5 : modèle complet du transformateur monophasé avec un couplage fort entre les sous-modèles électromagnétique et thermique.

Optimisation avec le modèle analytique

Le transformateur de sécurité est utilisé dans plusieurs équipements électriques : armoires électriques, électroménager, isolation, équipements de sécurité, etc. Le nombre de transformateurs de ce genre produit par an dans le monde est énorme. La production d'une telle quantité a un impact sur les ressources primaires particulièrement les ressources d'acier et de cuivre. Ainsi, la minimisation de la masse du transformateur peut réduire l'épuisement de ressources.

Le problème d'optimisation du transformateur est décrit par :

$$
\begin{aligned}
&min && f(X) = masse(X), X \in \mathbb{R}^7 \\
&\text{s.t.} && T_{copper} \leq 120;\ \ T_{iron} \leq 100;\ \ \eta \geq 0.8; \frac{I_{10}}{I_1} \leq 0.1; \frac{\Delta V_2}{V_2} \leq 0.1; f_1 \leq 0.5 \\
& && f_2 \leq 0.5 \\
&\text{avec} && X = [a, b, c, d, n_1, S_1, S_2] \\
& && 3\ mm \leq a \leq 30\ mm; 14\ mm \leq b \leq 95\ mm; 6\ mm \leq c \leq 40\ mm; \\
& && 10\ mm \leq d \leq 80\ mm; 200 \leq n_1 \leq 1200;\ 0.15\ mm^2 \leq S_1 \leq 19\ mm^2; \\
& && 0.15\ \ mm^2 \leq S_2 \leq 19\ mm^2
\end{aligned}
\qquad \text{(III.4)}
$$

Formulation MDF

Cette formulation est investiguée dans la structuration du problème d'optimisation avec deux méthodes pour résoudre le système implicite résultant des interactions. Les deux méthodes sont la méthode Levenberg-Marquardt (LM) qui est une méthode quasi-Newton et qui assure un couplage fort entre les deux sous-modèles du transformateur. La deuxième méthode est la méthode du point fixe qui assure un couplage faible entre les différentes disciplines. La structure du problème d'optimisation pour les deux méthodes est montré respectivement dans les figures III.6 et III.7.

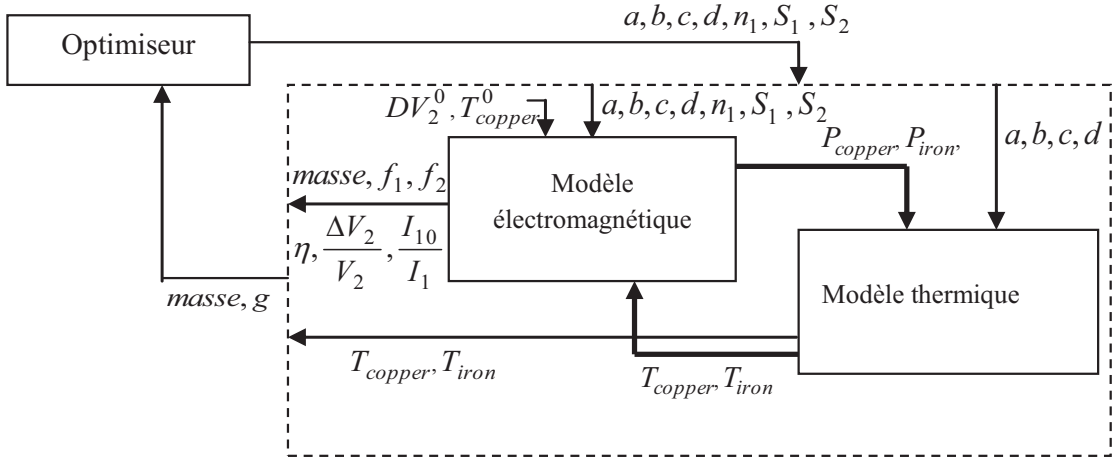


Figure III.6 : Structure du problème d'optimisation du transformateur avec la formulation MDF (couplage fort entre les sous-modèles électromagnétique et thermique) (MDF+LM)

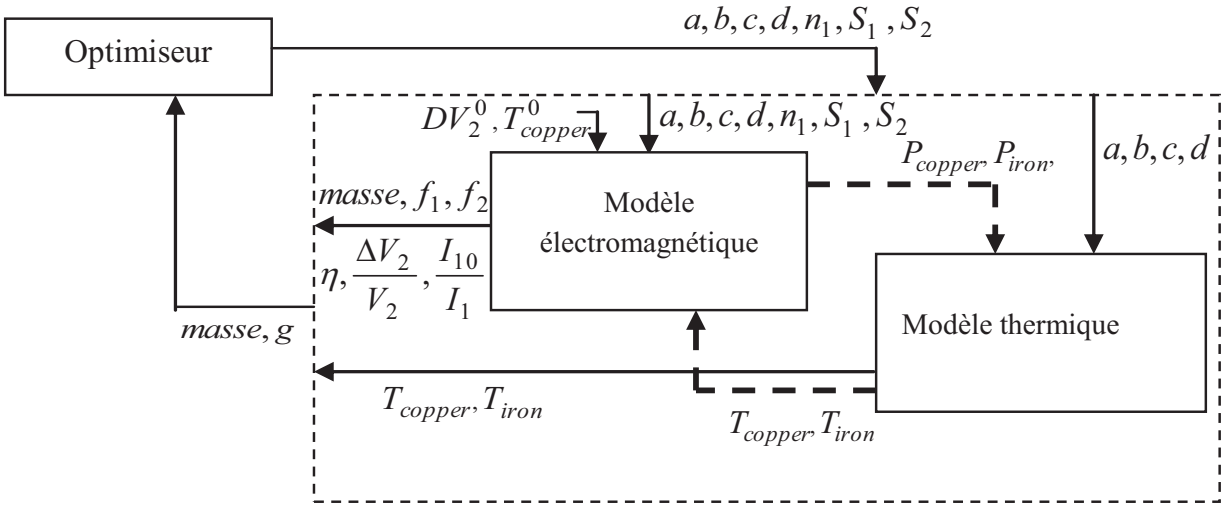


Figure III.7 : Structure du problème d'optimisation du transformateur avec la formulation MDF (couplage faible entre les sous-modèles électromagnétique et thermique) (MDF+FP)

Formulation IDF

Avec cette formulation, un vecteur $y' = [P'_{copper}, T'_{copper}]$ est ajouté au vecteur contenant les variables d'optimisation. Grâce aux variables dans y', il n'est pas nécessaire de résoudre le système implicite au moyen d'une des méthodes utilisées dans MDF. Pour assurer la consistance entre les sous-modèles, deux contraintes d'égalités h_1, h_2 sont ajoutées au problème d'optimisation.

$$\begin{aligned} h_1 &= T'_{copper} - T_{copper} = 0 \\ h_2 &= P'_{copper} - P_{copper} = 0 \end{aligned} \tag{III.5}$$

La structure du problème d'optimisation du transformateur monophasé avec la formulation IDF est montrée dans la figure III.8.

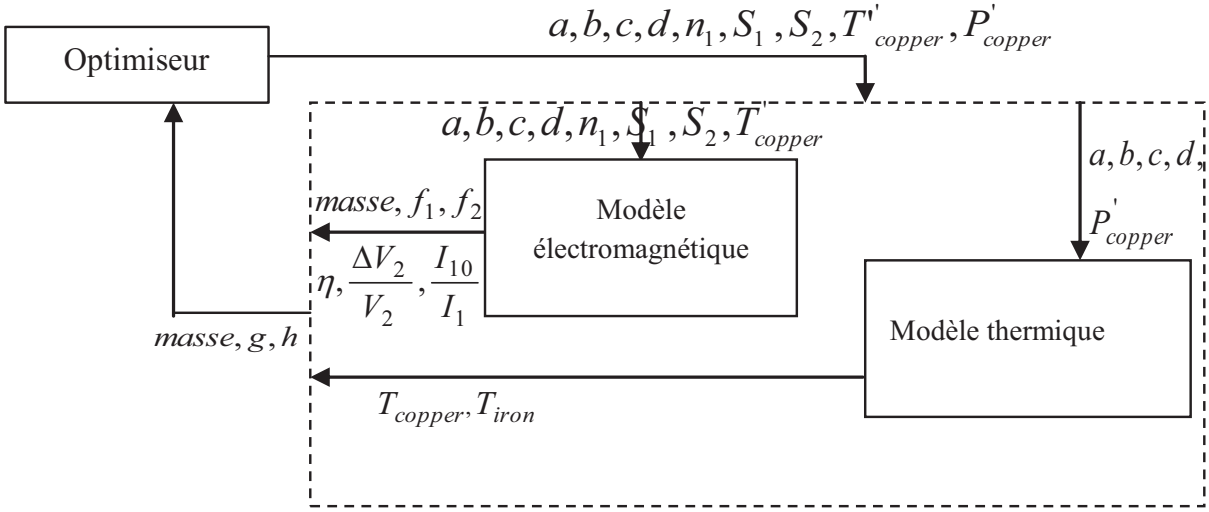


Figure III.8 : Structure du problème d'optimisation du transformateur monophasé avec la formulation IDF

Le problème d'optimisation avec la formulation IDF s'écrit :

$$
\begin{aligned}
min \quad & f(X) = masse(X, y'), X \in \mathbb{R}^7 \\
\text{s.à} \quad & T_{copper} \leq 120; \;\; T_{iron} \leq 100; \;\; \eta \geq 0.8; \frac{I_{10}}{I_1} \leq 0.1; \frac{\Delta V_2}{V_2} \leq 0.1; f_1 \leq 0.5 \\
& f_2 \leq 0.5; T'_{copper} = T_{copper}; P'_{copper} = P_{copper} \\
\text{avec} \quad & X = [a, b, c, d, n_1, S_1, S_2], y' = [DV_2', P'_{copper}] \\
& 3\ mm \leq a \leq 30\ mm; 14\ mm \leq b \leq 95\ mm; 6\ mm \leq c \leq 40\ mm; \\
& 10\ mm \leq d \leq 80\ mm; 200 \leq n_1 \leq 1200;\ 0.15\ mm^2 \leq S_1 \leq 19\ mm^2; \\
& 0.15\ mm^2 \leq S_2 \leq 19\ mm^2; 40\ °C \leq T'_{copper} \leq 200°C; \\
& 1\ W \leq P'_{copper} \leq 100\ W
\end{aligned}
\qquad \text{(III.6)}
$$

Formulation AAO

Avec la formulation AAO, toutes les inconnues du système implicite sont des variables d'optimisation additionnelles. La résolution du système implicite n'est ainsi plus faite dans les sous-modèles. Huit contraintes égalité r sont ajoutées au problème d'optimisation pour annuler les résidus des 8 équations du système implicite.

La structure du problème d'optimisation avec la formulation AAO est montrée dans la figure III.9.

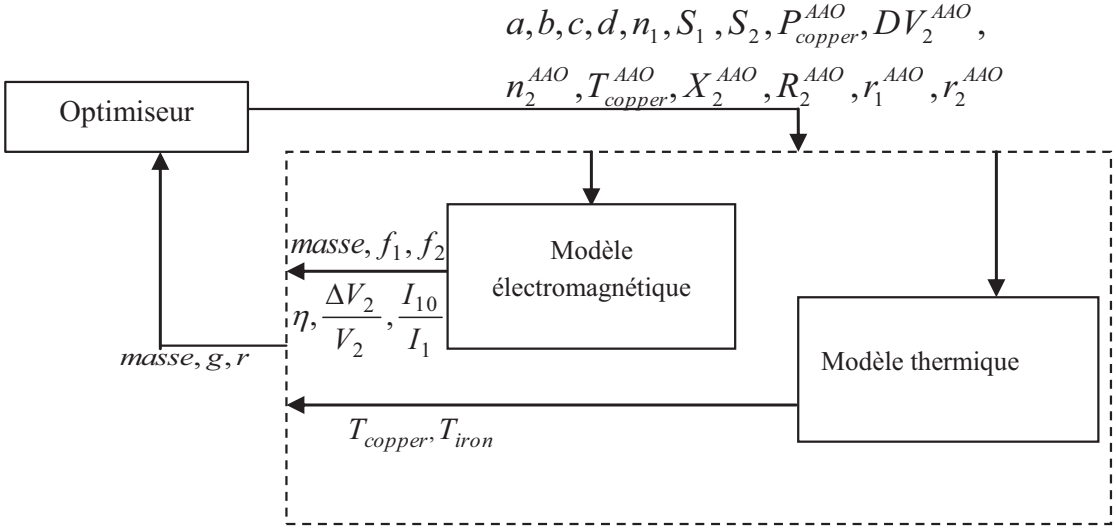


Figure III.9 : Structure du problème d'optimisation du transformateur monophasé avec la formulation AAO

Le problème d'optimisation s'écrit :

$$
\begin{aligned}
min \quad & f(X) = Mass(X, y^{AAO}), X \in \mathbb{R}^7 \\
& T_{copper} \leq 120; \;\; T_{iron} \leq 100; \;\; \eta \geq 0.8; \frac{I_{10}}{I_1} \leq 0.1; \frac{\Delta V_2}{V_2} \leq 0.1; f_1 \leq 0.5 \\
\text{s.à} \quad & f_2 \leq 0.5; \\
& r_2^{AAO} - \rho_{copper}\left(1 + \alpha_{copper} T_{copper}\right) n_2^{AAO} \frac{l_2}{S_2} = 0
\end{aligned}
\qquad \text{(III.7)}
$$

$$r_1^{AAO} - \rho_{copper}\left(1 + \alpha_{copper} T_{copper}\right) n_1^{AAO} \frac{l_1}{S_1} = 0$$

$$X_2^{AAO} - \frac{1}{3}\mu_0 (n_2^{AAO})^2 c \frac{4a+2d+\pi c}{b} = 0$$

$$n_2^{AAO} - \frac{n_1 (V_2 + DV_2^{AAO})}{V_1} = 0$$

$$\Delta V_2^{AAO} - (R_2^{AAO} cos\varphi_2 + X_2^{AAO} sin\varphi_2) I_2 = 0$$

$$P_{copper}^{AAO} - R_2^{AAO} I_2^2 = 0$$

$$T_{copper}^{AAO} - T_{air} + \frac{Rth_{copper/air}(Rth_{iron/air} P_{iron} + (Rth_{iron/copper} + Rth_{iron/air}) P_{copper}^{AAO})}{Rth_{iron/air} + Rth_{iron/copper} + Rth_{iron/air}} = 0$$

$$R_2^{AAO} - r_2^{AAO} - \left(\frac{n_2^{AAO}}{n_1}\right) r_1^{AAO} = 0$$

avec

$$X = [a, b, c, d, n_1, S_1, S_2],$$
$$y^{AAO} = [r_2^{AAO}, r_1^{AAO}, X_2^{AAO}, n_2^{AAO}, DV_2^{AAO}, P_{copper}^{AAO}, T_{copper}^{AAO}, R_2^{AAO}]$$

$$3\,mm \le a \le 30\,mm; 14\,mm \le b \le 95\,mm; 6\,mm \le c \le 40\,mm;$$
$$10\,mm \le d \le 80\,mm; 200 \le n_1 \le 1200;\ 0.15\,mm^2 \le S_1 \le 19\,mm^2;$$
$$0.15\,mm^2 \le S_2 \le 19\,mm^2; 5\Omega \le r_1^{AAO} \le 95\Omega, 0.06\Omega \le r_2^{AAO} \le 1\Omega$$
$$0.02\Omega \le X_2^{AAO} \le 0.04\Omega, 35 \le n_2^{AAO} \le 250, 0.1V \le \Delta V_2^{AAO} \le 24V,$$
$$1W \le P_{copper}^{AAO} \le 100W, 40°C \le T_{copper}^{AAO} \le 120°C, 0.06\Omega \le R_2^{AAO} \le 2\Omega$$

Résultats

Le problème d'optimisation du transformateur a été repris avec les trois formulations : MDF avec couplage faible (MDF+FP), MDF avec couplage fort (MDF+LM), IDF et AAO. Le but est de comparer les taux de convergence et le temps de calcul nécessaire pour résoudre le problème d'optimisation. Pour faire cette comparaison, le problème d'optimisation avec les formulations indiquées a été lancé avec 1000 points initiaux tirés au hasard et les résultats obtenus sont montrés dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : Comparaison du nombre moyen d'évaluations, du temps moyen de calcul et du taux de convergence des 1000 optimisations avec les trois formulations MDO

	IDF	AAO	MDF + LM	MDF + FP
Nombre moyen d'évaluations	414.37	559.3	415	443
Temps moyen de convergence (s)	0.272	0.34	2.328	0.3051
taux de convergence (%)	24.8	15.5	58.9	44.5

Ces résultats montrent que la formulation MDF+LM est la formulation la plus robuste mais elle est environ huit fois plus lente que les autres. En effet, les méthodes quasi-Newton sont très robustes dans la résolution des systèmes non-linéaire [CON-00], mais elles sont lourdes en temps de calcul parce que le système implicite est résolu à chaque évaluation du modèle alors que les autres formulations ne le nécessitent pas.

La formulation AAO est la formulation la plus mauvaise en termes de convergence parce que le nombre de variables d'optimisation a quasiment doublé ainsi que le nombre de contraintes fortement non linéaires, ce qui rend la convergence de l'algorithme d'optimisation plus difficile.

Les deux formulations MDF+FP et IDF représentent des taux de convergences acceptables et un temps de calcul plus court.

Optimisation avec le modèle éléments finis

Trois modèles élément finis ont été construits pour le transformateur :

- Un modèle électromagnétique en charge
- Un modèle électromagnétique à vide
- Un modèle thermique

Les entrées et sorties de ces modèles sont montrés en figure III.10. Pour les trois modèles, un maillage grossier (figure III.11) a été choisi afin de réduire le temps de l'optimisation. Ces modèles ont été validés par un dispositif expérimental [TRA-09].

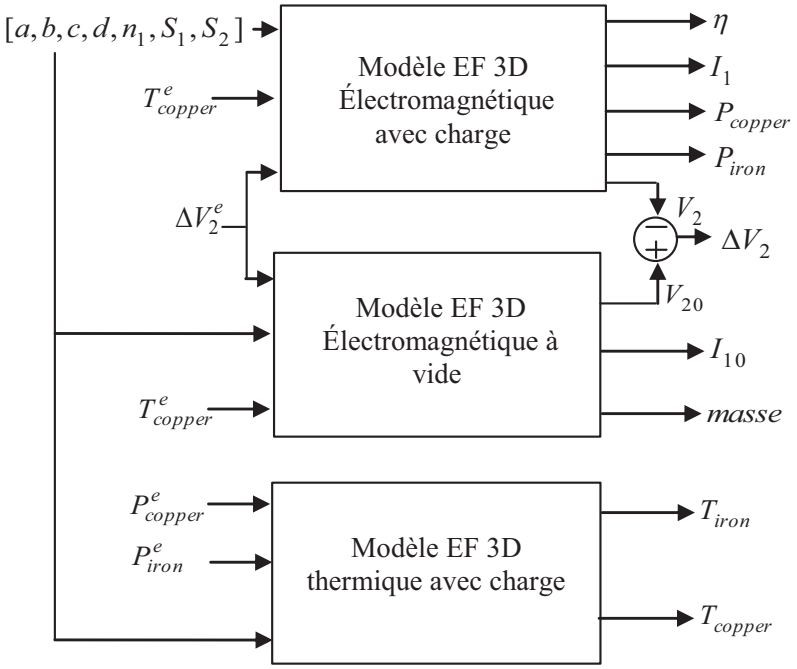


Figure III.10 : Modèles éléments finis 3D du transformateur et les variables d'optimisation (l'indice e indique les variables estimées par l'optimiseur)

Les résultats de l'optimisation avec le modèle analytique ont montré que les formulations IDF et MDF+FP présentent un bon compromis entre le temps de résolution et la robustesse. Pour cette raison, nous allons les exploiter pour structurer les problèmes d'optimisation avec des MEF. Il faut également préciser que les formulations MDF+LM et AAO nécessitent de modifier le code des modèles EF, ce qui nous est impossible.

Formulation MDF du problème d'optimisation avec les MEF 3D

Le processus d'optimisation avec la formulation MDF est montré dans la figure III.12. Le vecteur g représente les 7 contraintes d'inégalités présentées dans (III.4).

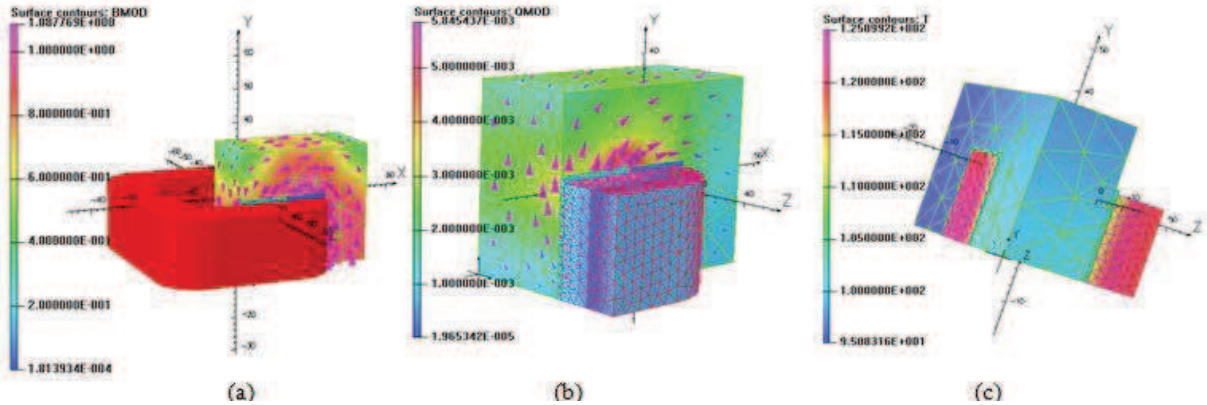


Figure III.11 : (a) Carte magnétique, (b) Carte du flux de chaleur, (d) Carte de la température du transformateur

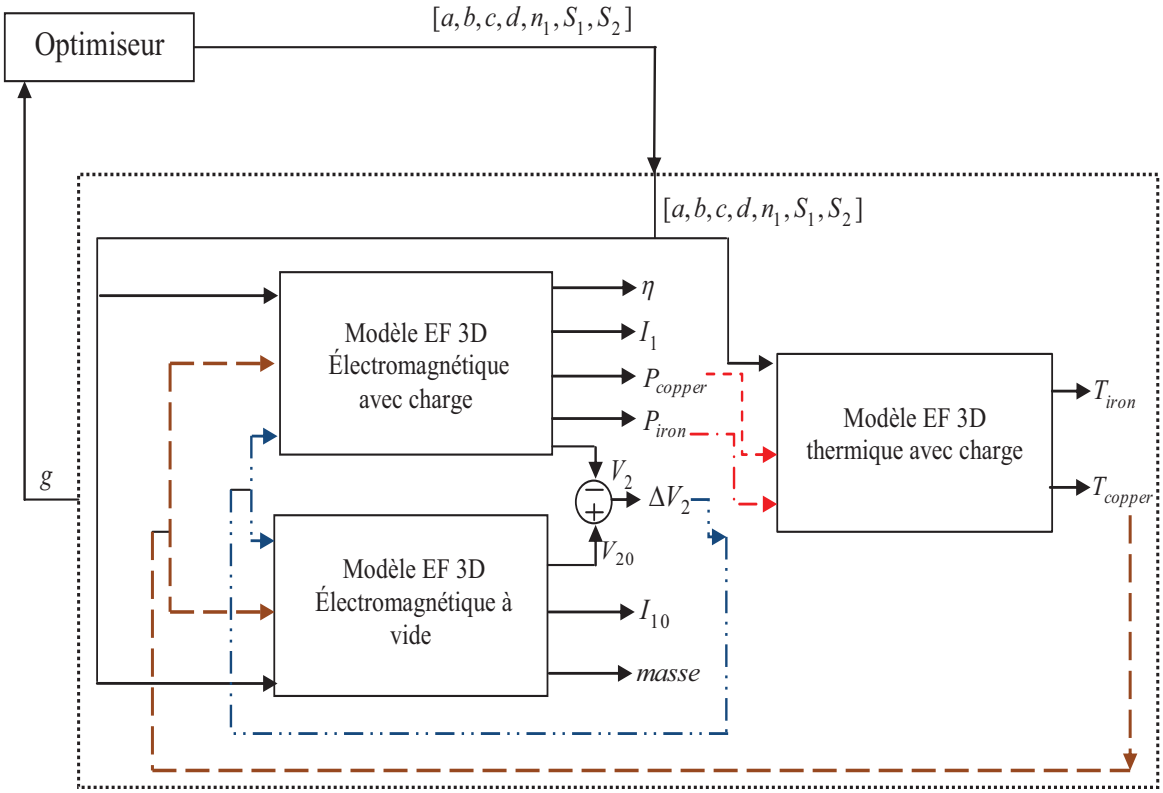


Figure III.12 : Structure du problème d'optimisation du transformateur avec formulation MDF+FP

Formulation IDF

Le vecteur des variables additionnelles pour résoudre les interactions entre sous-modèles EF3D est $y' = [T'_{copper}\ DV'_2\ P'_{copper}\ P'_{iron}]$ et le problème d'optimisation du transformateur est donné par (III.8).

Le processus d'optimisation est montré dans la figure III.13.

$$
\begin{aligned}
min \quad & f(X) = masse(X, y'), X \in \mathbb{R}^7 \\
& T_{copper} \leq 120; \quad T_{iron} \leq 100; \quad \eta \geq 0.8; \frac{I_{10}}{I_1} \leq 0.1; \frac{DV_2}{V_2} \leq 0.1; f_1 \leq 0.5 \\
\text{s.à} \quad & f_2 \leq 0.5; \quad \Delta V_2' = \Delta V_2; \quad P'_{copper} = P_{copper}; \quad P'_{iron} = P_{iton}; \quad T'_{copper} = T_{copper} \\
\text{avec} \quad & X = [a, b, c, d, n_1, S_1, S_2], y' = [T'_{copper}\ \Delta V_2'\ P'_{copper}\ P'_{iron}] \\
& 3\ mm \leq a \leq 30\ mm; 14\ mm \leq b \leq 95\ mm; 6\ mm \leq c \leq 40\ mm; \\
& 10\ mm \leq d \leq 80\ mm; 200 \leq n_1 \leq 1200;\ 0.15\ mm^2 \leq S_1 \leq 19\ mm^2; \\
& 0.15\ mm^2 \leq S_2 \leq 19\ mm^2; \qquad 0.1\ V \leq \Delta V_2' \leq 100V; 1\ W \leq P'_{iron} \leq 10\ W \\
& 1\ W \leq P'_{copper} \leq 100\ W; 40°C \leq T'_{copper} \leq 1000°C
\end{aligned}
\tag{III.8}
$$

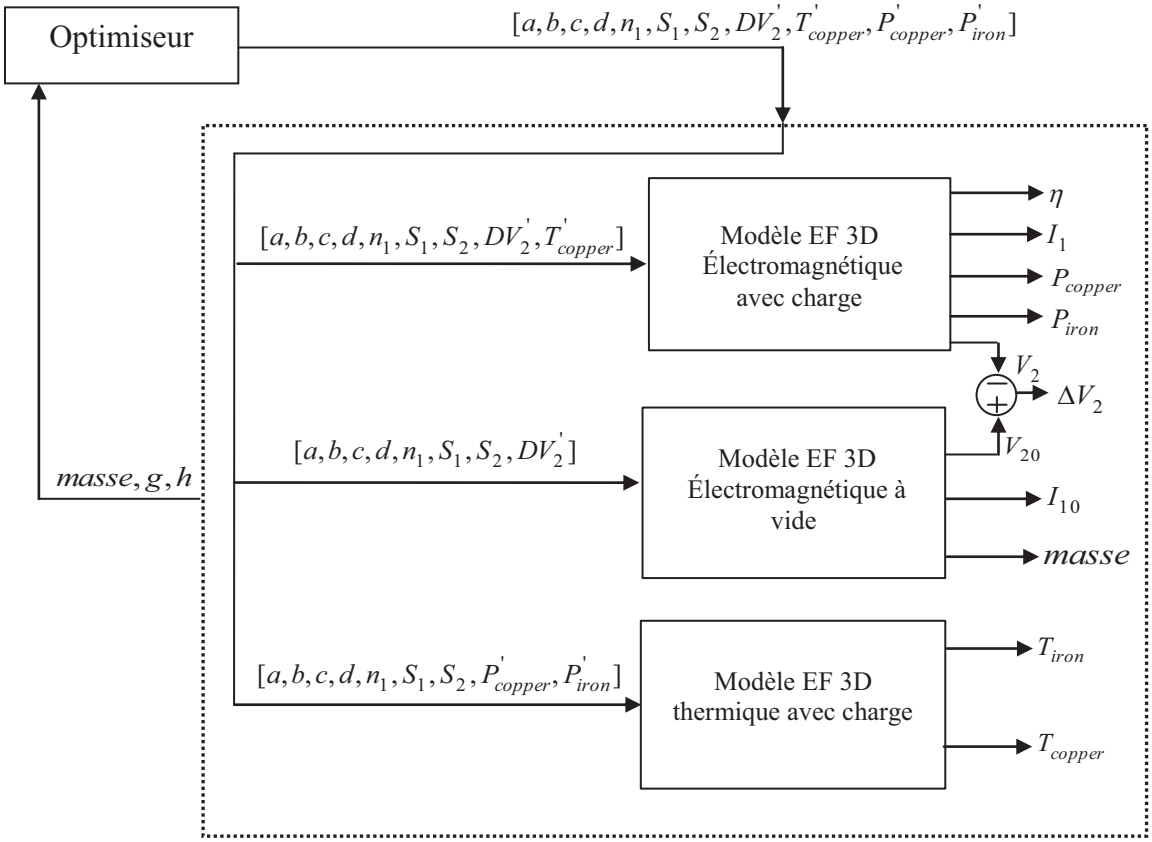


Figure III.13 : Structure du problème d'optimisation du transformateur avec formulation IDF

Lors de l'optimisation avec des modèles éléments finis 3D, nous avons constaté que celle-ci est très sensible au bruit numérique [NEI-96] et très lourde en temps de calcul. Enfin, au cours de l'optimisation, nous avons rencontré des difficultés de maillage pour certaines configurations du transformateur.

Une technique, connue sous le nom de space-mapping (SM) [BAN-94] [ECH-05], semble être une alternative intéressante à l'optimisation directe avec les MEF 3D. Cette technique permet d'éviter les problèmes cités dans le paragraphe précédent.

III.3. Output Space Mapping à deux niveaux

Le space-mapping est une méthode de projection qui combine les avantages des modèles fin (MEF 3D) et grossier (analytique). En effet, l'optimisation est faite avec le modèle grossier qui est très rapide mais peu précis. La solution trouvée est évaluée par le modèle fin qui est très lent mais aussi très précis. Le but de cette technique est de trouver une solution optimale en utilisant les modèle fin sans s'en servir dans l'optimisation afin d'éviter que les problèmes de maillage et de bruit n'affectent la convergence de l'algorithme d'optimisation.

D'autres techniques permettent de traiter des problèmes d'optimisation avec utilisation de modèle fin telles que efficient global optimization (EGO) et memetic algorithm (MA). Toutefois, le SM a été choisi pour résoudre ce genre de problème pour les raisons suivantes :

- EGO [JON-01] est une technique qui n'est pas pour l'instant bien adaptée à des problèmes d'optimisation avec des contraintes fortes comme ceci a été montré dans [RBA-11] et [BER-11] à travers une comparaison des performances des deux techniques sur l'optimisation du transformateur en mono-objectif et bi-objectif.
- MA [FRA-99] est une méthode stochastique de type hybride qui regroupe les avantages des algorithmes génétiques et des algorithmes déterministes. En effet, la recherche de l'optimum global est faite par une méthode stochastique et la recherche d'un optimum local (candidat) est faite par une méthode déterministe. Cette méthode présente un inconvénient parce que la recherche locale d'un candidat parmi une population nécessite l'évaluation du modèle fin plusieurs fois ce qui implique un temps de calcul important.
- Parmi les techniques d'optimisation associant « modèle fin » et « modèle grossier », il y a aussi une approche consiste à exploiter le modèle grossier (rapide) pour encadrer l'optimum [NGU-09]. On se sert du modèle grossier comme une méthode de type Boxing dans les méthodes d'optimisation locales. La précision sur les résultats est ensuite améliorée par une optimisation du modèle fin (mais en considérant un espace de recherche « réduit » issu de la méthode d'encadrement précédente).

Le SM a plusieurs variantes dont les plus connues sont agressive space-mapping (ASM) [BAN-95] [ENC0-8a], manifold mapping (MM) [ECH-06] et output space-mapping (OSM) [ENC0-8b] [TRA-10]. La première variante est la plus ancienne, elle utilise un processus d'extraction de paramètre très délicat à faire et nécessite en plus le calcul du gradient du modèle fin qui est souvent inconnu ou difficile à obtenir. MM et OSM sont les variantes les plus récentes qui évitent l'inconvénient d'ASM. En effet, MM utilise une technique de correction de défaut qui modifie la valeur à atteindre. OSM, quant à lui, utilise des correcteurs pour aligner les sorties de ces deux modèles.

OSM a été choisie pour être utilisé dans une démarche d'éco-conception parce que c'est une technique rapide et simple à implémenter. Cette technique a été testée sur l'optimisation du

transformateur dans le but d'obtenir des résultats satisfaisants avec un nombre minimum d'évaluations des trois sous-modèles éléments finis qui sont couteux en temps de calcul.

III.3.1. Principe

Généralement, le modèle grossier est désigné par $c(z) \in \mathbb{R}^p$ avec $z \in Z \subset \mathbb{R}^q$, et le modèle fin est désigné par $f(x) \in \mathbb{R}^p$ avec $x \in X \subset \mathbb{R}^q$. Le domaine de variation des variables d'entrées pour le modèle fin et grossier et le même c.-à-d. $Z \equiv X \subset \mathbb{R}^q$. Les contraintes non-linéaires du problème sont désignées respectivement par $g_c(x)$ et $g_f(x)$. Le vecteur x^* représente la solution du problème d'optimisation.

$$x^* = arg\min_{x \in X} \|f(x) - y\| \quad s.t.\, g_f(x) \leq 0 \tag{III.9}$$

Dans la pratique la résolution de (III.9) est très lente. L'optimisation est faite avec le modèle grossier comme il est indiqué dans (III.10).

$$z^* = arg\min_{z \in Z} \|c(z) - y\| \quad s.t.\, g_c(z) \leq 0 \tag{III.10}$$

L'algorithme OSM consiste à aligner les sorties du modèles grossier avec celles du modèle fin grâce à un vecteur de correcteur $\theta_1 \in \Theta \subset \mathbb{R}^p$, avec p est le nombre de variables dans le vecteur de sortie.

$$\begin{bmatrix} c(x, \theta_1^j) \\ g_c(x, \theta_1^j) \end{bmatrix} = diag\left(\theta_1^j\right). \begin{bmatrix} c(x) \\ g_c(x) \end{bmatrix} \tag{III.11}$$

Ces correcteurs sont mis à jour dans chaque itération de l'algorithme OSM par (III.12).

$$\theta_1{}^{j+1} = \begin{bmatrix} f(x_j^*)/c(x_j^*) \\ g_f(x_j^*)/g_c(x_j^*) \end{bmatrix} \tag{III.12}$$

Après, ces correcteurs sont appliqués aux sorties du modèle grossier pour calculer une nouvelle solution x_{j+1}^* pour l'itération suivante de l'algorithme OSM.

$$x_{j+1}^* = arg\min_{x \in X} \left\| c\left(x, \theta_1^{j+1}\right) - y \right\| \quad s.t.\, g_c(x, \theta_1^{j+1}) \leq 0 \tag{III.13}$$

Ensuite, la réponse du modèle fin est calculée en utilisant x_{j+1}^*. L'algorithme s'arrête lorsque la condition (III.14) est satisfaite.

$$\left\| \begin{bmatrix} c(x_j^*, \theta_1^j) \\ g_c(x_j^*, \theta_1^j) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f(x_j^*) \\ g_f(x_j^*) \end{bmatrix} \right\| \leq \varepsilon \tag{III.14}$$

III.3.2. Utilisation des formulations MDO

OSM_MDF

Les travaux menés sur le space-mapping trouvés dans la littérature [TRA-10] [ENC-08] utilisent la formulation MDF pour gérer le couplage des sous-modèles élément finis. Il en résulte un modèle consistant dont le temps de calcul est important. Toutefois, un modèle consistant n'est pas nécessaire dans le contexte d'une optimisation et entraîne une durée totale très longue comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent.

OSM_IDF

Pour réduire davantage le temps de calcul de la technique OSM, nous avons proposé d'exploiter la formulation IDF dans celle-ci pour plusieurs raisons.

Premièrement, la formulation IDF évite l'utilisation de la méthode du point fixe ou toute autre méthode itérative qui assure les liens entre les sous-modèles du transformateur. Par conséquent, elle évite les évaluations multiples des sous-modèles EF.

Deuxièmement, la formulation IDF permet de découpler les différentes disciplines impliquées dans un système, ce qui permet une distribution de calcul des sous-modèles sur plusieurs calculateurs. En utilisant la distribution de calcul, le temps d'évaluation des sous-modèles fins sera réduit à celui du sous-modèle le plus lent. Finalement, il n'y a plus de consistance à vérifier dans chaque itération OSM car elle est assurée à la convergence de l'algorithme.

Cette formulation a été appliquée à l'optimisation du transformateur dans [RBA-12]. Un vecteur de correcteurs θ_{IDF} a été utilisé pour aligner le modèle analytique sur le MEF suivant la relation (III.11). A chaque itération, l'optimisation avec le modèle grossier fourni au MEF les variables de l'optimisation $(a, b, c, d, n_1, S_1, S_2)$ et d'autres variables (variables de couplage) comme il est montré dans la figure III.14. Ces variables sont des sorties du modèle analytique corrigé et permettent de briser le couplage entre les disciplines thermique et électromagnétique et par conséquent chaque sous-modèles peut être évalué par un calculateur indépendamment des autres. L'algorithme s'arrête lorsque (III.15) est vérifiée.

$$\left|\frac{\eta-\eta}{\eta}\right|+\left|\frac{\frac{I_{10}}{I_1}-\frac{I_{10}^{SAM}}{I_1^{SAM}}}{\frac{I_{10}}{I_1}}\right|+\left|\frac{\frac{\Delta V_2}{\Delta V_{20}}-\frac{\Delta V_2^{SAM}}{\Delta V_2^{SAM}}}{\frac{\Delta V_2}{\Delta V_{20}}}\right|+\left|\frac{T_{copper}-T_{copper}^{SAM}}{T_{copper}}\right|+\left|\frac{T_{iron}-T_{iron}^{SAM}}{T_{iron}}\right|+$$
$$\left|\frac{P_{copper}-P_{copper}^{SAM}}{P_{copper}}\right|+\left|\frac{P_{iron}-P_{iron}^{SAM}}{P_{iron}}\right|\leq\varepsilon \qquad \text{(III.15)}$$

Le critère d'arrêt présenté dans (III.15) assure que les variables de couplage estimées par le modèle analytique corrigé (SAM) seront égales à leurs valeurs calculées par le modèle éléments finis, ce qui fournit la consistance entre les différents modèles lorsque l'algorithme converge.

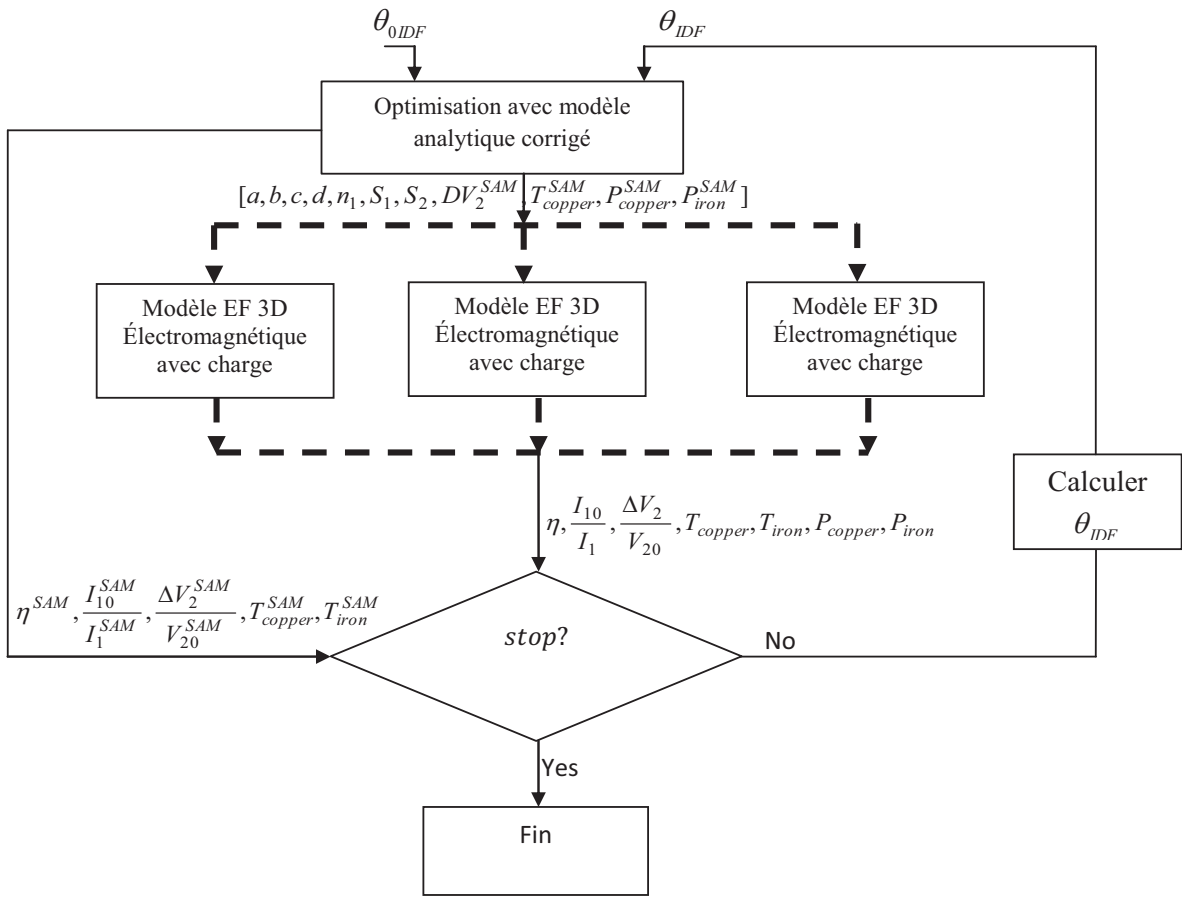


Figure III.14 : OSM_IDF appliquée à l'optimisation du transformateur monophasé

III.3.3. Comparaison des différentes démarches

L'optimisation du transformateur est faite avec différentes démarches : formulation IDF et optimisation directe avec le modèle éléments finis (*single level optimization*, SLO), formulation MDF et SLO, formulation IDF et OSM, et enfin formulation MDF et OSM. Les résultats sont montrés dans le tableau III.2. SLO_IDF et SLO_MDF ne convergent pas vers une même solution. En effet, il a été très difficile de trouver des points initiaux pour que l'algorithme SLO_IDF converge vers une solution. Pour surmonter ce problème, nous avons lancé cet algorithme avec plusieurs points initiaux tirés au hasard et nous avons sélectionné la meilleure solution.

Ce problème de points initiaux n'a pas été rencontré avec SLO_MDF. L'algorithme ne rencontre pas de problème de convergence mais son temps de calcul est très élevé.

Avec les algorithmes SLO_MDF et SLO_IDF, nous avons rencontré des problèmes de maillage au cours de l'optimisation parce que l'optimiseur propose des configurations très particulières du transformateur (les valeurs limites des variables d'optimisation) pour lesquelles le maillage est de très mauvaise qualité à cause des formes très aigues des éléments.

Tous les problèmes rencontrés précédemment pour SLO n'ont pas été rencontré avec OSM. Grâce à l'optimisation avec le modèle analytique, nous évitons les problèmes de maillage et nous avons des solutions dont les configurations sont maillées sans difficulté. L'OSM trouve

les mêmes résultats avec les deux formulations IDF et MDF, ce qui traduit la robustesse de cet algorithme de SM.

Tableau III.2 : Comparaison de l'optimisation directe et de OSM avec les formulations MDF et IDF

variables	Optimisation avec modèle analytique		SLO_IDF	SLO_MDF	OSM_MDF	OSM_IDF
$a\,(mm)$	12.92		13.7	17.6	13.1	13
$b\,(mm)$	50.122		56.7	56.4	51.2	50.8
$c\,(mm)$	16.612		220.04	18.5	16.8	16.7
$d\,(mm)$	43.252		33.33	27.6	43.1	43.7
n_1	640.772		774.57	736.43	641.038	635.2
$S_1\,(mm^2)$	0.325		0.3735	0.32417	0.3356	0.3346
$S_2\,(mm^2)$	2.9120		3.2921	3.0286	2.991	2.9832
	Modèle analytique	MEF 3D	MEF 3D	MEF 3D	MEF 3D	MEF 3D
$T_{copper}(°C)$	108.82	123.93	119.99	118.8	119.4	119.41
$T_{iron}(°C)$	100	103.17	99.16	97.34	100	100
$\Delta V_2 / V_2$	0.0691	0.0791	0.0874	0.0874	0.0753	0.0749
I_{10} / I_1	0.1	0.102	0.1	0.100	0.1	0.1
f_1	0.5	0.5	0.5	0.458	0.5	0.5
f_2	0.5	0.5	0.5	0.4855	0.5	0.5
η	0.8955	0.89	0.888	0.8836	0.8934	0.8939
Mass (kg)	2.3112	2.3112	2.4337	2.47	2.3733	2.3752
évaluations	217	6	154	761	5	5
time (s)	0.76	714	15489	90605	2201.7	400

Les résultats montrent aussi que l'OSM trouve des résultats meilleurs que SLO. Nous pouvons lier ceci au bruit numérique qui est probablement la cause d'une convergence prématurée de l'optimisation. Les solutions trouvées par l'OSM ne sont pas affectées par le bruit parce que l'optimisation est faite avec le modèle analytique.

Dans toutes les références que nous avons trouvées dans la littérature [TRA-10] [ENC-08b] [MOU-08], OSM a été toujours exploité avec la formulation MDF. Ceci est dû à la simplicité de cette formulation et au fait de disposer d'un modèle consistant qui peut fournir des résultats pertinents en dehors du contexte d'une optimisation.

L'investigation de la formulation IDF dans OSM, dans le cas du transformateur monophasé a réduit le temps de calcul de 5.5 fois par rapport à l'algorithme OSM_MDF utilisé dans la littérature. Le gain réalisé en temps de calcul est très appréciable.

Généralement, les machines électriques présentent des modèles analytiques et éléments finis pour les disciplines électromagnétique et thermique, comme c'est le cas du transformateur. Ainsi, l'utilisation de la formulation IDF est bénéfique à la technique OSM, surtout lorsque les modèles EF du dispositif à optimiser sont très lourds.

III.3.4. Conclusion sur MDO et OSM

Les résultats obtenus avec les modèles analytiques ont montré que les deux formulations MDF+LM et AAO ne sont pas avantageuses en temps de calcul et robustesse, contrairement aux formulations MDF+FP et IDF qui présentent toutes deux une robustesse acceptable et un temps de calcul court.

Ces deux formulations sont exploitées dans deux démarches : optimisation directe avec modèle éléments finis (*single level optimization*, SLO) et optimisation multi-niveau (*output space-mapping*, OSM), qui permettent d'utiliser des modèles éléments finis dans la procédure d'optimisation. La première démarche ne protège pas l'algorithme d'optimisation des points faibles du modèle, notamment le bruit numérique et les difficultés de maillage. Ceci s'est traduit par des difficultés de convergence lorsqu'un algorithme à base de gradient est utilisé (*Sequential Quadratic Programming*, SQP). La deuxième démarche consiste à exploiter le modèle grossier (analytique dans notre cas) dans l'optimisation et ensuite d'aligner ce modèle avec le modèle fin à l'aide des correcteurs. Cette stratégie permet à OSM d'éviter les problèmes rencontrés avec SLO.

Dans la littérature les formulations MDF et IDF sont déjà exploitées dans l'optimisation, surtout dans le domaine aéronautique. Dans le domaine du génie électrique, uniquement la formulation MDF a été exploitée avec OSM pour l'optimisation [ENC-08b] [TRA-10].

Dans ce travail, l'intérêt de l'utilisation de la formulation IDF pour assurer le couplage entre les modèles thermique et électromagnétique a été montré à travers l'exemple du transformateur. Cette technique permet de découpler les trois sous-modèles fins du transformateur et de les exécuter séparément sur des calculateurs différents. Le gain en temps de calcul par rapport à OSM_MDF est important.

Les paramètres influant sur le temps de calcul de l'algorithme OSM sont le nombre d'évaluations et le temps pris par une seule évaluation du modèle fin qui augmentent respectivement avec la non-linéarité du modèle et sa taille. Pour réduire davantage le nombre d'évaluations du modèle fin, des algorithmes OSM multi-niveau sont proposés dans la section suivante.

III.4. Output Space Mapping multi-niveau

III.4.1. Output Space Mapping à trois niveaux

Une idée que nous proposons [RBA-12] et [GON-12] pour réduire le nombre d'évaluations du modèle fin et par conséquent le temps de calcul d'OSM est d'introduire un troisième modèle entre le modèle fin et le modèle grossier. Le modèle introduit (modèle moyen) a une précision et un temps de calcul intermédiaires par rapport aux deux modèles utilisés auparavant. Ce modèle peut être, par exemple, un modèle éléments finis 2D, un modèle à constantes localisées ou un modèle éléments finis avec maillage grossier.

Principe

L'algorithme aligne, dans un premier temps, le modèle grossier avec le modèle moyen. Ensuite la solution trouvée est évaluée par le modèle fin. Les sorties du modèle fin serviront à calculer des correcteurs β du modèle moyen par simple division. L'algorithme s'arrête lorsque l'écart entre les sorties du modèles grossier corrigé et celle du modèle moyen corrigé est suffisamment petit.

On désigne par $m(x) \in \mathbb{R}^p$ le modèle moyen et par $g_m(x)$ les contraintes non-linéaires calculées par ce modèle. L'algorithme aligne le modèle grossier avec le modèle moyen grâce aux correcteurs θ_1 et le modèle moyen est aligné avec le modèle fin grâce aux correcteurs β.

$$\begin{bmatrix} c(x_j^*, \theta_1^j) \\ g_c(x_j^*, \theta_1^j) \end{bmatrix} = diag(\theta_1^j).\begin{bmatrix} c(x) \\ g_c(x) \end{bmatrix} \tag{III.16}$$

$$\theta_1^{j+1} = \begin{bmatrix} m(x_j^*, \beta)/c(x_j^*) \\ g_m(x_j^*, \beta)/g_c(x_j^*) \end{bmatrix} \tag{III.17}$$

Ces correcteurs sont introduits dans le modèle grossier pour calculer la solution x_{j+1}^* pour l'itération suivante.

$$x_{j+1}^* = arg\min_{x \in X} \left\| c(x, \theta_1^{j+1}) - y \right\| \;\; s.t. \, g_c(x, \theta_1^{j+1}) \leq 0 \tag{III.18}$$

L'alignement du modèle grossier par le modèle moyen s'arrête lorsque (III.19) est vérifié.

$$\left\| \begin{bmatrix} c(x_j^*, \theta_1^j) \\ g_c(x_j^*, \theta_1^j) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m(x_j^*, \beta) \\ g_m(x_j^*, \beta) \end{bmatrix} \right\| \leq \varepsilon \tag{III.19}$$

où ε est la précision souhaitée.

Ensuite, lorsque l'alignement du modèle grossier et moyen est terminé, x_j^* est utilisée pour calculer les sorties du modèle fin et mettre à jour le vecteur β des correcteurs qui permet d'aligner le modèle moyen comme suit:

$$\beta = \begin{bmatrix} f(x_j^*)/m(x_j^*) \\ g_f(x_j^*)/g_m(x_j^*) \end{bmatrix} \tag{III.20}$$

$$\begin{bmatrix} m(x_j^*, \beta) \\ g_m(x_j^*, \beta) \end{bmatrix} = diag(\beta).\begin{bmatrix} m(x) \\ g_m(x) \end{bmatrix} \tag{III.21}$$

L'algorithme s'arrête lorsque:

$$\left\| \begin{bmatrix} m(x_j^*, \beta) \\ g_m(x_j^*, \beta) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f(x_j^*) \\ g_f(x_j^*) \end{bmatrix} \right\| \leq \varepsilon \tag{III.22}$$

Pour résumer l'algorithme OSM_3n procède comme suit:

0. Initialisation $j = 0, \theta_1^0 = I, \beta = I$
1. Optimisation avec le modèle grossier corrigé (III.18)
2. Evaluation de la solution trouvée dans 1. i.e. x_j^* avec le modèle moyen
3. Calcul des correcteurs du modèle grossier θ_1^{j+1}avec (III.17)
4. Si (III.19) : *j=j+1* et revenir à 1.
5. Evaluation de la solution trouvée dans 1. par le modèle fin.
6. Mise à jour des correcteurs du modèle moyen, i.e. β par le modèle fin (III.20) et $\theta_1^{j+1} = \theta_1^j$
7. Si (III.22) revenir à 1.
8. Stop

Applications

L'algorithme a été testé sur les deux benchmarks trouvés dans la littérature. Le premier est celui du transformateur monophasé déjà présenté et le deuxième est celui d'un système de stockage de l'énergie magnétique (SMES) connu dans la littérature par TEAM WORKSHOP problem #22.

Transformateur d'isolation monophasé

Il s'agit du transformateur monophasé déjà présenté dont le problème d'optimisation est donné en (III.5).

Les trois modèles choisis pour le transformateur sont le modèle analytique (MA) et deux modèles EF 3D (MEF) avec des maillages différents. Les deux modèles sont disponibles sur le site du L2EP. Le MEF est le modèle le plus précis il contient 75517 nœuds et 442118 éléments. Il est utilisé dans la technique d'OSM pour corriger les sorties du modèle analytique afin de mieux respecter les contraintes fixées dans le cahier des charges.

Le troisième modèle est le modèle moyen (MM) obtenu aisément du MF en choisissant un maillage plus grossier. Ce modèle contient 4893 nœuds et 27024 éléments. Le MM possède des caractéristiques intermédiaires à celles du MA et du MF. En effet, ce modèle est plus précis que le modèle analytique mais il est plus rapide que le modèle EF.

Le tableau III.3 montre les temps de simulation et les précisions pour les trois modèles. Le niveau de précision est déduit à partir des mesures expérimentales réalisées sur le transformateur. En effet, l'erreur max dans le Tableau III.3 représente l'erreur maximale en (%) entre les sorties des modèles et les mesures expérimentales.

Tableau III.3 : Temps de simulation des différents modèles du transformateur

Modèle	Temps (s)	Erreur max (%)
MA	0.76	9.04
MM	65	6.96
MF	850	2.77

Système de stockage d'énergie magnétique SMES (team workshop problem #22)

Le SMES est un système constitué de deux bobines coaxiales parcourues par des courants qui circulent dans des sens inverses. Les deux bobines sont fabriquées avec des matériaux supraconducteurs. Ce système est conçu pour stocker l'énergie magnétique en gardant une induction minimale tout au long d'un périmètre carré situé à 10 m du centre des bobines comme le montre la figure III.15.

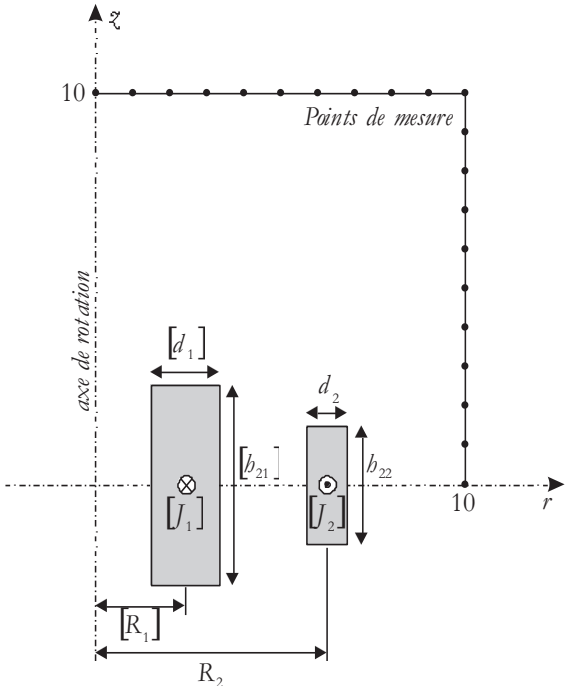


Figure III.15 : Système de deux bobines supraconductrices pour stockage d'énergie

Le problème d'optimisation [ALL-96] consiste à minimiser la moyenne des carrés des champs magnétiques mesurés en 22 points distincts et la valeur absolue de la différence entre l'énergie stockée et sa valeur souhaitée de 180 MJ. Une seule contrainte non-linéaire assure les propriétés des matériaux supraconducteurs (*quench condition*).

Le problème d'optimisation est donné par (III.23).

$$\min_{R_2,h_2 d_2} OF = \frac{B_{stray}^2}{B_{norm}^2} + \frac{|Energy - Eref|}{Eref} \quad \text{(III.23)}$$

$avec\ 2.6\ m \leq R_2 \leq 3.4\ m; 0.408\ m \leq h_2 \leq 2.2\ m; 0.1\ m \leq d_2 \leq 0.4\ m$

$s.\text{à}\ B_{max} \leq 4.92$ T

avec $B_{stray}^2 = \frac{1}{22}\sum_{i=1}^{22} {B_{stray_i}}^2$; $E_{ref} = 180\ MJ$ et $B_{norm} = 3\ mT$

La contrainte sur l'induction magnétique maximale est une forme simplifiée de la « quench condition » ($|J| = (-6.4\ B + 54.0)\ A/mm2$) qui assure la supraconductivité des matériaux.

Pour construire un modèle analytique, nous avons supposé que chaque spire d'une bobine supraconductrice est assimilable à un dipôle magnétique parcouru par un courant linéique (figure III.16). Chaque bobine est découpée en N_k dipôles élémentaires. Chaque dipôle est parcouru par un courant $I = JdS$.

Les expressions de la densité du champ magnétique et du potentiel vecteur créés par ce courant I dans un point quelconque de l'espace ainsi que les autres composantes magnétiques sont développées dans [DUR-68] et données en III.24.

$$\begin{cases} A_i(\rho, z_i, I) = \dfrac{\mu_0 I}{k_i \pi}\sqrt{\dfrac{a_i}{\rho}}\left[\left(1 - \dfrac{{k_i}^2}{2}\right)K(k_i) - E(k_i)\right] \\ B_{\rho i}(\rho, z_i, I) = -\dfrac{\partial A}{\partial z} = \dfrac{\mu_0 I k_i z_i}{4\pi\rho\sqrt{a_i\rho}}\left[-K(k_i) + \dfrac{{a_i}^2 + \rho^2 + {z_i}^2}{(a_i - \rho)^2 + z^2}E(k_i)\right] \\ B_{zi}(\rho, z_i, I) = \dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial}{\partial\rho}(\rho A) = \dfrac{\mu_0 I k_i z_i}{4\pi\sqrt{a_i\rho}}\left[K(k_i) + \dfrac{{a_i}^2 - \rho^2 - {z_i}^2}{(a_i - \rho)^2 + {z_i}^2}E(k_i)\right] \end{cases} \quad \text{(III.24)}$$

où

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{x^{\,2} + y^{\,2}} \\ k_i = \sqrt{\dfrac{4a_i\rho}{(a_i + \rho)^2 + {z_i}^{\,2}}} \end{cases} \quad i = 1 \ldots N_k$$

Avec K(k) et E(k) sont respectivement les intégrales elliptiques complètes de premier et du deuxième type.

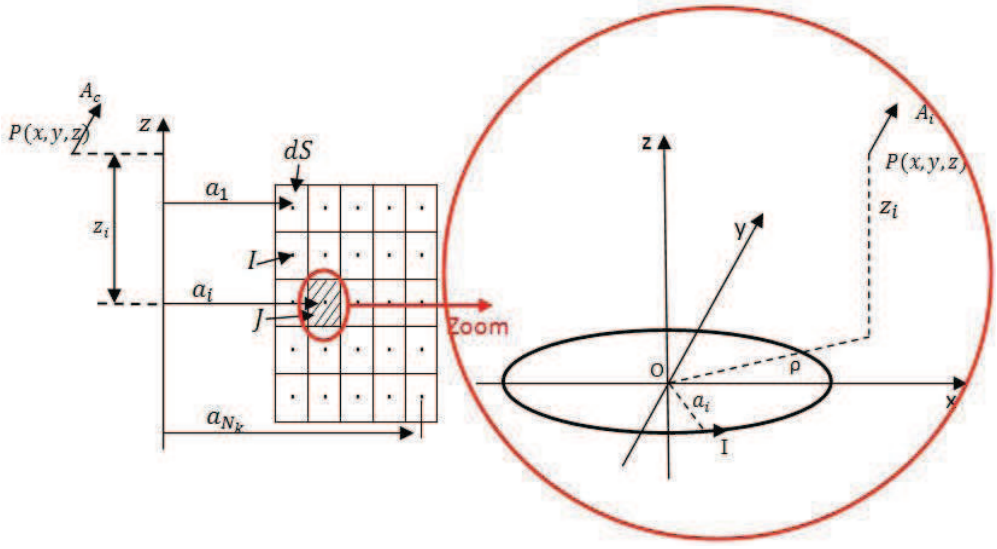


Figure III. 16 : Potentiel vecteur crée par un dipôle magnétique

L'expression de l'énergie magnétique stockée est déduite à partir de la mutuelle entre deux dipôles et elle est donnée par (III.25).

$$\begin{cases} W_{e12} = \dfrac{1}{2} I_2 \Phi_{12} \\ \Phi_{12} = 2\pi a_2 A_1(a_2, (z_2 - z_1), I_1) \end{cases} \quad \text{(III.25)}$$

Pour N_k dipôles, ces expressions peuvent s'écrire :

$$A_c(\rho, z_i, I) = \sum_{i=1}^{N_k} A_i(\rho, z_i, I) = \sum_{i=1}^{N_k} \frac{\mu_0 I}{k\pi} \sqrt{\frac{a_i}{\rho}} \left[\left(1 - \frac{{k_i}^2}{2}\right) K(k_i) - E(k_i) \right] \quad \text{(III.26)}$$

$$W_b = \sum_{i,j}^{i \neq j} W_{eij} = \sum_{i,j}^{i \neq j} \frac{1}{2} \mathrm{I_i} \Phi_{\mathrm{ji}} \quad \text{(III.27)}$$

La précision sur la fonction objective et le temps de calcul du modèle construit dépendent du nombre N_k d'éléments choisis dans les bobines. Ainsi, plusieurs modèles avec différentes précisions peuvent être obtenus facilement en faisant varier N_k. Le tableau III.5 montre l'évolution du temps de calcul et la précision du modèle avec le nombre d'éléments dans la bobine. Par exemple pour N_k=400 éléments la figure III.17 montre une comparaison du modèle analytique et du modèle EF 2D. L'erreur entre les deux modèles est inférieure à 1%.

Le modèle qui possède la plus haute précision est un modèle EF 2D développé dans [BER-09]. Ce modèle contient 552202 nœuds et 275215 éléments. Une seule évaluation de ce modèle prend 784 secondes.

Le tableau III.4 montre que, plus le nombre d'éléments augmente, plus le temps de calcul et la précision du modèle augmentent. Ainsi, on peut obtenir un grand nombre de modèles avec des précisions différentes.

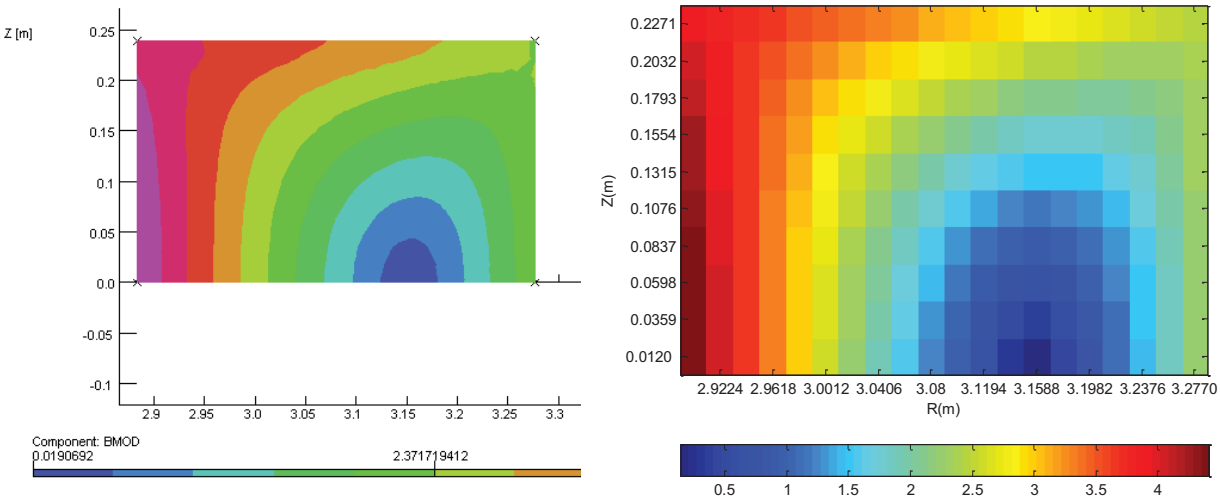


Figure III.17 : Comparaison de l'induction dans la bobine extérieure du SMES entre un modèle analytique (à droite) utilisant 400 éléments et le modèle EF 2D (à gauche)

Tableau III.4 : Précision et temps de calcul du modèle élaboré en fonction du nombre d'éléments

Nombre d'éléments	Temps de calcul (s)	Erreur sur ‖OF‖ (%)
1	0.016	254
100	1.61	7.2
400	24.8	0.3
900	127.53	0.14

Résultats de Output Space Mapping 3-niveaux

Pour les deux benchmarks, l'optimisation avec les modèles analytiques a été lancée avec 10 points initiaux tirés au hasard. Les meilleures solutions de l'optimisation avec le modèle analytique sont évaluées avec les modèles moyens. Cette stratégie réduit le risque de tomber sur une solution locale.

Les nombres d'évaluations des différents modèles des deux benchmarks sont montrés dans les tableaux III.5 et III.6. La précision des solutions d'OSM_2n (OSM classique) et d'OSM_3n sur le transformateur et sur le SMES, est détaillée respectivement dans les tableaux III.7 et III.8.

Dans le tableau III.8, les solutions trouvées par OSM_2n et OSM_3n pour le SMES sont également comparées à celles trouvées dans la littérature par une méthode d'optimisation probabiliste globale [TEA-11].

Tableau III.5 : Nombre d'évaluations des différents modèles par les algorithmes OSM n-niveaux dans le cas du transformateur

Evaluations	MF	MM	MG	Temps (s)
OSM_2n	8	-	287	7018
OSM_3n	2	10	70	2421

Tableau III.6 : Nombre d'évaluations des différents modèles par les algorithmes OSM n-niveaux dans le cas du SMES

Evaluations	MF	MM	MG	Temps (s)
OSM_2n	7	-	2476	5527
OSM_3n	2	4	1452	2101

Tableau III.7 : Comparaison résultats OSM_3n et OSM classique pour le transformateur

Paramètres	OSM_3n	OSM_2n
T_{copper} (°C)	119.4	119.4
T_{iron} (°C)	99.99	100.00
$\frac{I_{10}}{I_1}$	0.99	0.99
$\frac{\Delta V_2}{V_2}$	0.0742	0.0742
Mass (kg)	2.376	2.376

Tableau III.8 : Comparaison des résultats OSM_3n et OSM classique pour le SMES

Paramètres	OSM_3n	OSM_2n	[TEA-11]
R_2 (m)	3.08	3.08	3.08
$h_2/2$ (m)	0.2404	0.2404	0.2390
d_2 (m)	0.3936	0.3936	0.3940
OF	0.08920	0.08910	0.08808
${B_{stray}}^2$(T)	7.9381e-7	7.9386e-7	7.9138e-7
Energy (MJ)	180.2128	180.2129	180.0277

Dans les cas des deux benchmarks, les tableaux III.5 et III.6 montre qu'un gain minimal de 2.6 dans le temps de calcul a été réalisé grâce à l'algorithme OSM_3n en gardant la même précision sur les solutions obtenues que OSM classique (2 niveaux), ce qui est confirmé par les tableaux III.7 et III.8.

Le gain en temps de calcul est réalisé dans l'OSM_3n par l'insertion d'un troisième modèle (modèle moyen, MM). Les tableaux III.5 et III.6 montrent que le MM a été évalué 10 fois dans le cas du transformateur et 4 fois dans celui du SMES. Ceci a permis d'économiser respectivement 6 et 5 évaluations du MF. Les évaluations du MM coûtent respectivement 650 et 509 secondes alors que les évaluations économisées du MF auraient coûtées respectivement 5100 et 3925 secondes, ce qui correspond à un gain global en temps de calcul de 4450 et 3416 secondes.

Le tableau III.8 montre que les solutions trouvées par OSM sont très proches de celle trouvée par une méthode d'optimisation globale. Ces résultats confortent notre démarche qui consiste à choisir des points initiaux multiples pour l'optimisation avec le modèle grossier.

En conclusion, l'OSM_3n est un algorithme adapté de l'OSM qui nécessite l'exploitation d'un troisième modèle qui possède des caractéristiques moyennes (temps de calcul et précision) entre celles des deux modèles utilisés classiquement dans l'OSM. L'algorithme adapté permet de trouver la même solution obtenue par l'algorithme classique mais dans un temps nettement plus cours. La construction du troisième modèle est aisée puisqu'il peut être obtenu en dégradant le maillage du modèle fin.

Cette technique peut être généralisée pour n-modèles avec *n* niveaux de précision.

III.4.2. Output Space Mapping n-niveaux

L'OSM n-niveaux [RBA-11b] utilise *n* modèles du dispositif à optimiser afin de réduire davantage le temps de calcul de la technique OSM classique. Les *n* modèles présentent *n*-niveaux de précision. L'idée de cet algorithme est de rapprocher rapidement et progressivement la précision du modèle grossier au modèle fin grâce aux (n-2) modèles introduits.

Les *n* modèles utilisés peuvent être classés suivant la figure III.18.

Le 1er modèle représente le modèle le plus grossier mais aussi le plus rapide alors que le $n^{ème}$ modèle représente le modèle le plus précis mais aussi le plus lourd en temps de calcul. Ces

deux modèles sont les modèles utilisés dans l'OSM_2n (classique). Les autres modèles $(2^{ème}, \dots, (n-1)^{ème})$ sont les *n-2* modèles introduits qui serviront à réduire le nombre d'évaluations du modèle fin et donc le temps de calcul de l'algorithme.

Figure III. 18 : classement des modèles selon leur précision et temps de calcul

Principe

On désigne par $m_i(x) \in \mathbb{R}^p$ les *i (i=1...n)* modèles utilisés dans OSM n-niveaux, $m_1(x)$ et $m_n\ (n)$ désignent respectivement les modèles grossier et fin; $m_i(x)$ / *i=2... (n-1)* désignent les modèles moyens. $g_i(x)$ *i=1...n* les contraintes non-linéaires calculées par les *n* modèles. La stratégie de cet algorithme consiste à aligner le $i^{ème}$ modèle avec le $(i+1)^{ème}$ modèle en utilisant des vecteurs de correcteurs $\beta_k, \theta_1 \in \Theta \subset \mathbb{R}^p, k = 2 \dots n-1$. Ces correcteurs sont calculés itérativement par :

$$\theta_1^{j+1} = \begin{bmatrix} m_2(x_j^*, \beta_2)/m_1(x_j^*) \\ g_2(x_j^*, \beta_2)/g_1(x_j^*) \end{bmatrix} \tag{III.28}$$

$$\beta_k = \begin{bmatrix} m_{k+1}(x_j^*, \beta_{k+1})/m_k(x_j^*) \\ g_{k+1}(x_j^*, \beta_{k+1})/g_k(x_j^*) \end{bmatrix} \ k = 2..(n-1) \tag{III.29}$$

$$\begin{bmatrix} m_1(x_j^*, \theta_1^j) \\ g_1(x_j^*, \theta_1^j) \end{bmatrix} = diag\left(\theta_1^j\right). \begin{bmatrix} m_1(x_j^*) \\ g_1(x_j^*) \end{bmatrix} \tag{III.30}$$

$$\begin{bmatrix} m_k(x_j^*, \beta_k) \\ g_k(x_j^*, \beta_k) \end{bmatrix} = diag(\beta_k). \begin{bmatrix} m_k(x_j^*) \\ g_k(x_j^*) \end{bmatrix} \ k = 2..(n-1) \tag{III.31}$$

Le vecteur θ_1^{j+1} des correcteurs est appliqué au modèle grossier pour calculer la solution x_{j+1}^* pour l'itération suivante.

$$x_{j+1}^* = arg \min_{x \in X} \left\| m_1\left(x, \theta_1^{j+1}\right) - y \right\| \ \ s.t. g_1(x, \theta_1^{j+1}) \leq 0 \tag{III.32}$$

La solution trouvée dans (III.32) sera évaluée par m_2. L'OSM classique entre les modèles m_1 et m_2 s'arrête lorsque (III.33) est vérifiée.

$$\left\| \begin{bmatrix} m_2(x_j^*, \beta_2) \\ g_2(x_j^*, \beta_2) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m_1(x_j^*, \theta_1^j) \\ g_1(x_j^*, \theta_1^j) \end{bmatrix} \right\| \leq \varepsilon \tag{III.33}$$

Le passage à un niveau supérieur n'est pas possible tant que (III.34) n'est pas validée.

$$\left\| \begin{bmatrix} m_1(x_j^*, \theta_1^j) \\ g_1(x_j^*, \theta_1^j) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m_k(x_j^*, \beta_{k+1}) \\ g_k(x_j^*, \beta_{k+1}) \end{bmatrix} \right\| \leq \varepsilon \quad \text{(III.34)}$$

L'algorithme OSM n-niveaux s'arrête lorsque (III.32) est satisfaite.

$$\left\| \begin{bmatrix} m_1(x_j^*, \theta_1^j) \\ g_1(x_j^*, \theta_1^j) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m_n(x_j^*) \\ g_{m_n}(x_j^*) \end{bmatrix} \right\| \leq \varepsilon \quad \text{(III.35)}$$

Pour résumer l'algorithme OSM n-niveaux procède comme suit :

0- initialisation: $\mathrm{j} = 0, \mathrm{k} = 2, \theta_1^0 = \mathrm{I}, \beta_{2..\mathrm{n}} = \mathrm{I}$
1- optimisation avec le 1er modèle: trouver la solution de (III.30), i.e. x_j^*.
2- calculer $\mathrm{m}_2\left(\mathrm{x}_\mathrm{j}^*, \beta_2\right)$, $\mathrm{g}_2\left(\mathrm{x}_\mathrm{j}^*, \beta_2\right)$ et $\theta_1^{\mathrm{j}+1}$ avec (III.28) et (III.31)
3- $j = j + 1$
4- revenir à l'étape 1- si (III.33) n'est pas vérifié
5- calculer $\mathrm{m}_{\mathrm{k}+1}\left(\mathrm{x}_\mathrm{j}^*, \beta_{\mathrm{k}+1}\right)$ et $\mathrm{g}_{\mathrm{k}+1}\left(\mathrm{x}_\mathrm{j}^*, \beta_{\mathrm{k}+1}\right)$
6- calculer $\beta_\mathrm{k} \cdots \beta_2$ by using (III.29)
7- revenir à l'étape 1 si (III.34) n'est pas validé
8- $\mathrm{k} = \mathrm{k} + 1$
9- revenir à l'étape 5 si (III.35) n'est pas validé
10- stop

III.4.3. Application

L'algorithme a été testé avec le benchmark du SMES en utilisant 4 modèles avec différentes précisons : un modèle dans lequel chaque bobine est considérée comme un dipôle ($N_k = 1$) c'est le modèle grossier (MG), un modèle avec 5 éléments par bobine (MM0), un modèle avec 100 éléments par bobine (MM1), un modèle avec 900 éléments par bobine (MM2) et un modèle fin qui est le modèle EF 2D.

Les résultats de l'OSM *n*-niveaux sont détaillés dans les tableaux III.9 et III.10. Le tableau III.9 montre le nombre d'évaluations de chaque modèle et le temps de calcul des algorithmes d'OSM n-niveaux. Quant au tableau III.10, il montre la précision des solutions trouvées par chaque algorithme par rapport à la solution trouvée dans la littérature [TEA-11].

Tableau III.9 : Comparaison des temps de calcul d'OSM_2n, OSM_3n, OSM_4n et OSM_5n

Evaluations	MF	MM2	MM1	MM0	MG	temps (s)
OSM 5-niveaux	2	2	2	10	1225	1849
OSM 4-niveaux	2	2	3	-	1230	1849
OSM 3-niveaux	2	4	-	-	1452	2101
OSM 2-niveaux	7	-	-	-	2476	5527

Le tableau III.9 montre que l'OSM 4-niveaux est plus rapide en temps de calcul que l'OSM_3n. En effet, l'utilisation du modèle MM1 qui possède des caractéristiques (c.à.d. un temps de calcul et une précision) intermédiaires entre le modèle MM2 et MG a permis de réduire le nombre d'évaluations du modèle MM2 de 2 évaluations soit 255 secondes. Par contre, les trois évaluations du modèle MM1 coûtent 75 secondes, ce qui fait au total un gain global de 180 secondes. La bonne précision de la solution trouvée par OSM_4n est confirmée par le tableau III.10.

Tableau III.10 : Comparaison des temps de calcul d'OSM_2n, OSM_3n, OSM_4n et OSM_5n

	R_2 (m)	$h_2/2$ (m)	d_2 (m)	OF	$B_{stray}{}^2$(T)	Energy (MJ)
[TEA-11]	3.08	0.2390	0.3940	0.08808	7.9138e-7	180.0277
OSM_2n	3.08	0.2405	0.3937	0.08910	7.9382e-7	180.1622
OSM_3n	3.08	0.2405	0.3937	0.08920	7.9530e-7	180.1572
OSM_4n	3.08	0.2405	0.3936	0.08960	7.9503e-7	180.2215
OSM_5n	3.08	0.2405	0.3936	0.08963	7.9501e-7	180.2535

Dans le tableau III.9, nous constatons qu'à partir du niveau 5, le temps de calcul ne décroit plus. En effet, le modèle MM0 a été évalué 10 fois pour économiser une évaluation du modèle MM1, ce qui fait un gain de 0.3 seconde. Ceci explique que les temps de calcul de l'OSM_5n et de l'OSM_4n soient identiques.

De ce qui précède, nous pouvons tirer que l'OSM_n-niveaux n'apporte plus de gain en temps de calcul à partir d'un certain niveau (4 pour le cas du SMES). Nous avons remarqué aussi que le grand gain en temps de calcul est apporté par l'OSM_3n par rapport à l'OSM classique et qui est plus simple à programmer.

OSM n-niveaux est un algorithme adapté d'OSM qui permet de réduire davantage le temps de calcul par rapport à la technique classique grâce à des modèles de différentes précisions du dispositif à optimiser. L'obtention de ces modèles est très facile car ils peuvent être déduits d'un seul modèle, en agissant simplement sur le nombre d'éléments utilisés dans le calcul (cas du SMES) ou la densité du maillage d'un MEF. Le nombre de modèles à utiliser ne doit pas dépasser 4 car le gain en temps de calcul n'est plus intéressant. L'OSM n-niveaux est plus intéressant à utiliser dans l'optimisation des dispositifs dont une seule évaluation du modèle fin peut prendre une heure. C'est le cas des composants d'une chaine de traction ferroviaire comme, par exemple, le transformateur de traction.

III.5. Conclusion

Les composants ferroviaires sont des composants particulièrement difficiles à modéliser parce qu'ils impliquent plusieurs disciplines en même temps (magnétique, thermique, électrique mécanique des fluides, etc.) qui interagissent entre elles. Ces interactions compliquent

davantage le problème d'optimisation. Dans la littérature des formulations MDO peuvent être exploitées pour résoudre ce genre de problème. En effet, les tests faits sur le benchmark du transformateur monophasé ont montré que la formulation MDF+FP offre les avantages de la rapidité, de la simplicité et de la consistance du modèle en dehors du contexte de l'optimisation.

Les modèles éléments finis des composants d'une chaine de traction sont très lourds en temps de calcul vu le nombre de disciplines qu'ils impliquent et la taille des modèles. Dans ce chapitre, nous avons montrés, à travers le benchmark du transformateur, que l'optimisation directe avec des modèles éléments finis n'aboutit pas à des résultats intéressants à cause de la sensibilité de ces modèles au bruit numérique et aux difficultés de maillage. Ce chapitre confirme également que la technique du space-mapping est une alternative intéressante à l'optimisation directe.

OSM est une technique développée pour éviter les problèmes rencontrés dans l'optimisation directe et obtenir des résultats satisfaisants dans un temps réduit. Cependant, dans l'optimisation d'un composant ferroviaire le temps de calcul de cette variété du SM risque d'être important parce qu'un modèle complet d'un tel dispositif peut contenir plusieurs sous-modèles et qu'une seule évaluation de ce modèle est très lourde.

Dans ce chapitre, l'investigation de la formulation IDF dans OSM pour gérer les interactions entre les sous-modèles éléments finis a montré, à travers le benchmark du transformateur monophasé, un gain important dans le temps de calcul par rapport à la formulation MDF utilisée classiquement dans la littérature. Ce gain est réalisé parce qu'IDF permet de briser les interactions entre les différents sous-modèles et de les lancer sur différents calculateurs sans perte de précision sur l'optimum. Le gain en temps de calcul est réalisé car le temps d'évaluation du modèle complet est réduit au temps nécessaire pour évaluer le sous-modèle le plus lent.

Une adaptation a été aussi proposée pour réduire davantage le temps de calcul d'OSM. Elle consiste à introduire des modèles intermédiaires entre le modèle grossier et le modèle fin utilisés classiquement dans l'OSM. L'algorithme adapté appelé OSM_n-niveaux a été testé sur les benchmarks du transformateur monophasé et celui du système de stockage d'énergie magnétique (SMES). Les résultats montrent que l'OSM_n-niveau apporte un gain significatif dans le temps de calcul de l'OSM utilisé habituellement sans perte de précision sur la solution trouvée.

IV. Chapitre 4 : Optimisation de l'ensemble transformateur de traction et PMCF

IV.1. Introduction

L'optimisation de l'ensemble transformateur de traction (TT) et redresseur d'entrée, nommé aussi pont monophasé à commutation forcée (PMCF), nécessite des modèles multidisciplinaires des deux composants et un cahier des charges dans lequel on fixe les objectifs ou critères de qualité, les contraintes et les variables d'optimisation ainsi que leurs intervalles de variation.

Dans un premier temps, on présente le cahier des charges fixé pour l'ensemble TT et PMCF. En effet, le cahier des charges va nous donner des idées sur les modèles qu'il faut élaborer et aussi sur la taille et le type du problème d'optimisation. La connaissance de ces derniers permet le bon choix des algorithmes d'optimisation. Dans un deuxième temps, on présente les modèles élaborés pour le TT et le PMCF du Tram Train et on vérifie leur adéquation vis-à-vis du cahier des charges de l'optimisation. Ces modèles permettent de calculer les quantités de matériaux utilisés, les grandeurs électriques qui sont principalement les pertes dans les deux composants et les inductances de fuite dans le transformateur. Ils permettent aussi de calculer les principales grandeurs thermiques dans les deux composants. Les modèles sont validés par les mesures faites sur le PMCF et le TT actuels avant d'être utilisés dans l'optimisation pour trouver un ensemble de solutions qui seront ensuite analysées.

IV.2. Cahier des charges pour l'optimisation

IV.2.1. Critères

L'objectif principal de cette thèse est l'éco-conception de la chaine de traction du Tram Train qui consiste, en deux mots, à réduire les impacts environnementaux de la chaine avec un coût maitrisé.

L'aspect économique est souvent représenté dans la littérature par la masse du dispositif. Quant à sa performance environnementale, elle est représentée par le potentiel de réchauffement climatique ou Global Warming (GW) comme dans [CON-08] ou par l'énergie consommée sur cycle de vie (W_{LCA}) dans [DEB-07]. Les questions du critère à utiliser et de son influence sur les résultats de l'optimisation sont donc posées et seront traités dans une section dédiée à l'analyse de sensibilité des résultats.

En se basant sur l'ACV réalisée dans le chapitre 2, nous avons identifié des pistes d'amélioration de la performance environnementale du transformateur et du coffre de traction. Parmi ces pistes, une des plus prometteuses consiste à réduire la somme des pertes dans le transformateur et les composants semi-conducteurs utilisés dans le PMCF. Cette piste est retenue et nous choisissons, pour l'instant, les pertes de l'ensemble TT et PMCF comme un critère environnemental.

Pour récapituler, les deux critères d'optimisation conflictuels et non pondérables sont :

- La masse du transformateur
- Les pertes dans le TT et les PMCF.

IV.2.2. Variables

Pour comprendre la signification des variables d'optimisation, nous présentons dans une première partie la géométrie des différentes parties du transformateur puis nous précisons sa relation avec le PMCF dans la deuxième partie de cette section.

Géométrie du transformateur

La géométrie du transformateur est celle utilisée dans les transformateurs à colonnes. Le circuit magnétique est similaire à celui présenté en figure IV.1 autour duquel sont enroulées six bobines. Chacune de ces bobines est constituée d'un enroulement primaire désigné par P dans la figure IV.2, lui-même entouré d'un enroulement secondaire désigné par S.

- *Bobinage primaire*

Il est constitué de 6 enroulements en parallèles, les diamètres internes et externes de chaque bobine sont connus. Cela permettra de vérifier la validité du modèle géométrique. Les bobines se composent d'un nombre de spires n_1 réparties en un nombre de couches désigné par $n_{1couche}$. Ces couches sont elles-mêmes regroupées par groupes de couches. Les groupes sont séparés par un nombre de canal désigné par n_{canal}. L'épaisseur d'un canal est notée e_{canal1}. Un matériau diélectrique permet d'isoler les couches entre-elles à l'intérieur des groupes de couches.

Le fil de bobinage primaire peut être en aluminium ou en cuivre. Ses dimensions sont connues ainsi que les caractéristiques de son isolation diélectrique. On note respectivement par E_1 et L_1 l'épaisseur radiale et la hauteur axiale du fil primaire.

- *Bobinage secondaire*

Le bobinage secondaire est réalisé de manière similaire et le même type d'information est connu. L'utilisation de câble transposé marque la différence principale avec le primaire. Le rôle du câble transposé est de réduire les effets de proximité dus aux courants importants qui circulent au secondaire. On note respectivement par E_2 et L_2 les dimensions d'un méplat secondaire.

- *Circuit magnétique*

Il s'agit d'un circuit magnétique à colonnes constitué de deux noyaux circulaires de rayon R_{cm} et de deux culasses rectangulaires. Le circuit magnétique est réalisé à partir d'un empilement de tôles magnétiques à grains orientés et laminées à froid [DEB-06]. La circularité des noyaux magnétiques est assurée par un empilement en gradins comme illustré sur figure IV.1.

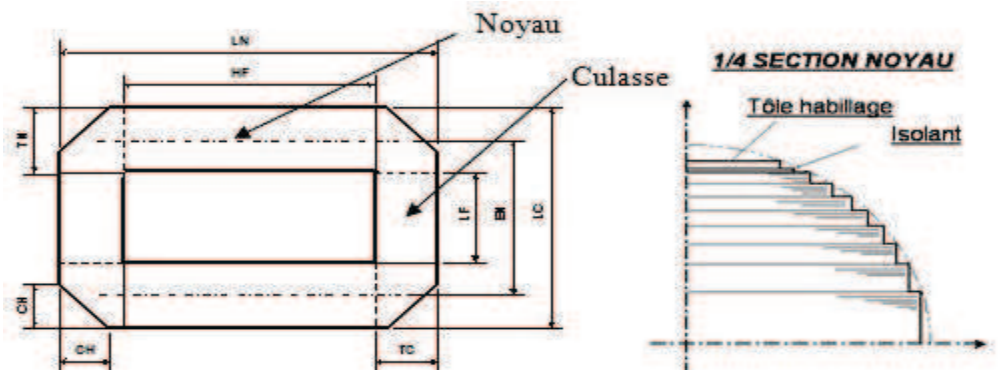


Figure IV.1 : Circuit magnétique d'un transformateur colonne [DEB-06]

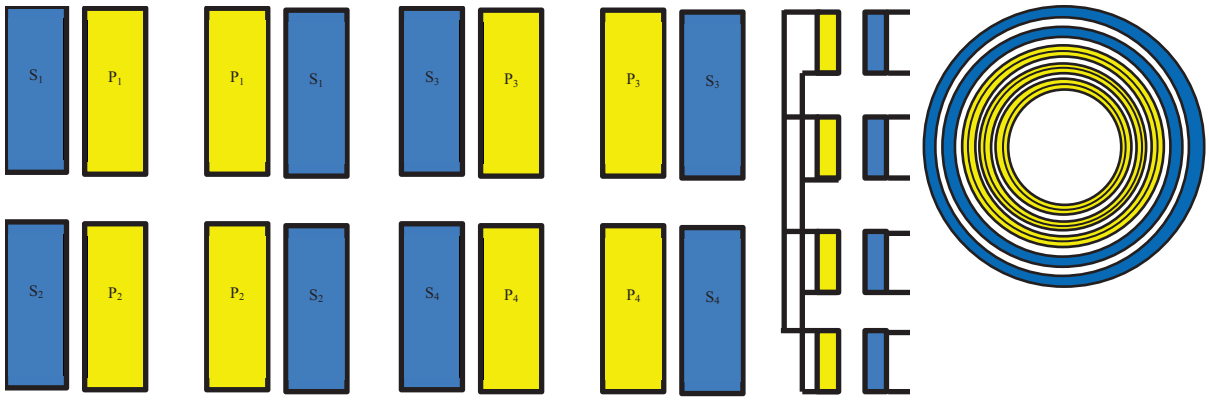


Figure IV.2 : Schéma de principe des bobinages pour un transformateur à 4 bobines [DEB-06] à droite une vue de dessus d'un bobinage

Interactions électromagnétiques entre les composants

Le transformateur est en relation directe avec deux composants de la chaine de traction : la caténaire et les convertisseurs PMCF. Les bobines primaires (désignées par P sur la figure IV.2) sont connectées en parallèle et reliées à la caténaire. La liaison avec le réseau nécessite d'absorber ou de renvoyer vers la caténaire un courant le plus sinusoïdal possible.

D'autre part, chaque enroulement secondaire est relié à un convertisseur PMCF. Le PMCF utilise une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI (sinus-triangle)). Pour obtenir des formes d'ondes sinusoïdales, cette technique exige l'utilisation d'une fréquence de découpage élevée. Cependant, l'utilisation d'une fréquence de commutation élevée est incompatible avec le maintien d'un bon rendement pour la chaine de traction étant donnée les puissances mises en jeu dans le domaine du ferroviaire. C'est pourquoi il persiste un spectre harmonique dû aux convertisseurs dans le transformateur. En effet, pour obtenir des signaux avec très peu d'harmoniques, c'est à dire quasiment sinusoïdaux, il est d'usage dans d'autres applications d'avoir des porteuses MLI de l'ordre de 10 kHz. Dans le ferroviaire, il est rare de voir cette fréquence, notée ici par F_p, dépasser le kilohertz.

Il faut cependant noter que le fait d'avoir un convertisseur PMCF par secondaire permet d'utiliser des techniques de modulation par entrelacement des convertisseurs qui vont permettre d'annuler certains harmoniques.

Pour récapituler sur les variables d'optimisation, nous avons choisi 8 variables géométriques parmi 60 dimensions et une variable pour le PMCF car à l'aide de ces variables on peut déterminer la géométrie complète et calculer la masse des différents composants. En plus, ces variables ont une influence significative sur les critères d'optimisation (masse et pertes).

Le transformateur de traction implique les disciplines : électrique, magnétique, mécanique des fluides, mécanique et thermique dans sa modélisation. Quant au PMCF, il implique les disciplines : électrique et thermique. Pour le PMCF, nous avons décidé d'agir sur la fréquence de commutation des IGBT. En effet, la fréquence de commutation F_p a des influences sur le transformateur et le PMCF :

- Influence sur le transformateur : chaque secondaire du transformateur est directement lié à un PMCF qui génère des harmoniques de courant. Le spectre harmonique dépend de la fréquence de commutation imposée par le système de commande du PMCF. Une variation de F_p engendre une variation des harmoniques renvoyés sur un secondaire du transformateur et, par conséquent, sur ses pertes et son rendement et donc sur sa performance environnementale comme il est montré dans le chapitre 2.
- Influence sur le PMCF : la fréquence de commutation a une influence sur les pertes dans les IGBT du PMCF et par conséquence sur leur température de jonction dont la valeur maximale est fixée par le constructeur.

Les différentes variables d'optimisation ainsi que leurs domaines de variations sont :

Rayon équivalent du circuit magnétique :

$$R_{cm-min} \leq R_{cm} \leq R_{cm-max} \tag{IV.1}$$

Nombre de spires primaires :

$$n_{1-min} \leq n_1 \leq n_{1-max} \tag{IV.2}$$

Hauteur axiale du fil primaire :

$$L_{1-min} \leq L_1 \leq L_{1-max} \tag{IV.3}$$

Epaisseur radiale du fil primaire :

$$E_{1-min} \leq E_1 \leq E_{1-max} \tag{IV.4}$$

Hauteur axiale du fil secondaire :

$$L_{2-min} \leq L_2 \leq L_{2-max} \tag{IV.5}$$

Epaisseur radiale du fil secondaire :

$$E_{2-min} \leq E_2 \leq E_{2-max} \quad \text{(IV.6)}$$

Epaisseur du canal d'huile dans le primaire et le secondaire :

$$e_{canal-min} \leq e_{canal1} = e_{canal2} \leq e_{canal-max} \quad \text{(IV.7)}$$

Epaisseur de l'écran avec les deux canaux d'huile :

$$e_{ecran-min} \leq e_{ecran} \quad \text{(IV.8)}$$

Fréquence de commutation des IGBT du PMCF :

$$F_{p-min} \leq F_p \leq F_{p-max} \quad \text{(IV.9)}$$

IV.2.3. Contraintes

Généralement, dans l'optimisation des convertisseurs électromagnétiques, il y a plusieurs types de contraintes qu'il faut prendre en compte pour assurer le bon fonctionnement du dispositif. Ces contraintes sont principalement :

Des contraintes thermiques sont ajoutées au cahier des charges de l'optimisation pour s'assurer que la température des matériaux ne dépasse pas une valeur limite garantissant un vieillissement normal du matériau. Le seuil est fixé par le fabricant du matériau. Par exemple, dans un transformateur, les températures des conducteurs ne doivent dépasser la température limite des isolants, sans quoi ces isolants perdent leurs propriétés diélectriques et des courts-circuits se forment.

Les contraintes géométriques sont très sévères dans le cas de systèmes embarqués. Elles sont souvent exprimées par des volumes, masses ou dimensions à ne pas dépasser. Elles assurent également la cohérence géométrique de la structure.

Des contraintes techniques qui permettent d'assurer le bon fonctionnement du composant dans l'ensemble du système. Comme par exemple la contrainte sur l'ondulation de courant, inversement proportionnelle à l'inductance de fuite dans le transformateur, et qui permet de déterminer la valeur maximale du courant à commuter dans les IGBT du PMCF.

Pour le transformateur de traction, nous avons fixé les contraintes suivantes :

La température de la couche la plus chaude au primaire :

$$\max\left(T_{pr}\right) \leq T_{pr-max} \quad \text{(IV.10)}$$

La température de la couche la plus chaude au secondaire :

$$\max\left(T_{sc}\right) \leq T_{sc-max} \quad \text{(IV.11)}$$

Contrainte de mécanique des fluides pour assurer un écoulement laminaire d'huile :

$$Re \leq 2000 \; et \; \frac{L_{canal}}{3D_{eq}RePr} \leq 0.026 \tag{IV.12}$$

La température haute d'huile :

$$T_{oil-sup} \leq T_{oil-max} \tag{IV.13}$$

Volume de la cuve du transformateur :

$$V_{cuve} \leq V_{cuve-ac} \tag{IV.14}$$

La durée de vie du transformateur doit être supérieure à 30 ans :

$$D_{vie} \geq 30ans \tag{IV.15}$$

Les coefficients de couplage C_{ij} entre secondaire :

$$0 \leq C_{ij} \leq C_{ij-max} \tag{IV.16}$$

L'ondulation maximale du courant est inférieure à 11% de la valeur maximale du courant nominal :

$$\Delta I_s \leq \Delta I_{s-max} \tag{IV.17}$$

La densité de l'induction maximale sous la tension nominale :

$$B_m \leq B_{m-max} \tag{IV.18}$$

Température de jonction d'un IGBT du PMCF :

$$T_{IGBT} \leq T_{IGBT-max} \tag{IV.19}$$

Température de jonction d'une diode du PMCF :

$$T_{diode} \leq T_{diode-max} \tag{IV.20}$$

La pression exercée par les forces électromagnétiques sur la paroi extérieure des enroulements en cuivre est inférieure à F_{cc_cu-max} lorsque le transformateur est court-circuité :

$$F_{cc_cu} \leq F_{cc_cu-max} \tag{IV.21}$$

La pression exercée par les forces électromagnétiques sur la paroi extérieure des enroulements en aluminium est inférieure à $F_{cc_{alu}-max}$ lorsque le transformateur est court-circuité.

$$F_{cc_alu} \leq F_{cc_{alu}-max} \tag{IV.22}$$

La température moyenne des enroulements en cuivre après un court-circuit de 3s est inférieure à $T_{cc_{cu}-max}$:

$$T_{cc_cu} \leq T_{cc_{cu}-max} \tag{IV.23}$$

La température moyenne des enroulements en aluminium après un court-circuit de 3s est inférieure à $T_{cc_{alu}-max}$:

$$T_{cc_alu} \leq T_{cc_{alu}-max} \tag{IV.24}$$

Le calcul des différentes contraintes sera détaillé dans les paragraphes suivants.

IV.3. Démarche

Pour répondre à ce cahier des charges et satisfaire aux contraintes exprimées, des méthodes d'optimisation sont utilisées. L'exploitation de ces méthodes implique l'élaboration de modèles qui traduisent le plus fidèlement possible le comportement du dispositif à optimiser.

Dans le cas de l'ensemble Transformateur et PMCF, nous avons suivi la démarche suivante :

- Elaborer les modèles du transformateur capable de calculer ses pertes en tenant en compte des harmoniques de courant générés par le PMCF pour une fréquence de commutation donnée.
- Valider tous les modèles élaborés par les mesures obtenues lors des tests expérimentaux réalisés par ALSTOM sur le transformateur ou par simulation avec l'outil métier CITHEL® développé par ALSTOM.
- Elaborer un modèle de commande du PMCF capable de reproduire le spectre harmonique du courant et de la tension pour une fréquence de commutation et le valider par un logiciel de simulation des circuits électriques, comme par exemple PSIM®.
- Elaborer un modèle multidisciplinaire du PMCF pour calculer ses pertes et les températures de jonction des IGBT.
- Assurer la bonne prise en compte des interactions entre les différents modèles élaborés pour calculer correctement les différents critères et contraintes au cours de l'optimisation. Dans ce but, nous avons exploité les résultats du chapitre 3 qui montrent que les formulations MDF+FP et IDF sont les plus efficaces lorsque des

modèles analytiques sont utilisés dans l'optimisation. La formulation MDF+FP a été choisie dans le cas du transformateur de traction avec le PMCF parce qu'elle est simple à implémenter et elle permet l'évaluation du modèle en dehors de l'optimisation.

Les modèles élaborés et interconnectés forment un modèle complet de l'ensemble transformateur et PMCF. Ce modèle complet est utilisé pour l'optimisation de l'ensemble des deux composants sous les contraintes de bon fonctionnement fixées dans le cahier des charges et pour atteindre nos objectifs qui sont l'amélioration de l'efficacité énergétique de la chaine de traction du Tram Train et la réduction de la masse du transformateur.

IV.4. Elaboration des modèles nécessaires

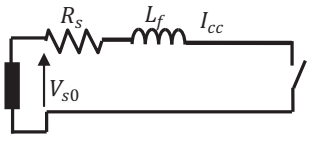
IV.4.1. Transformateur

Transformateur en court-circuit

Le modèle du transformateur en court-circuit est très important pour le dimensionnement de celui-ci. En effet, un court-circuit est le pire des cas pour un transformateur car ses enroulements seront parcourus par des courants de très forte intensité qui peuvent le détruire en une durée de temps très courte. Cependant, dans les cahiers des charges des transformateurs de puissance, on trouve souvent la durée de temps pendant laquelle le transformateur doit supporter un court-circuit afin de laisser le temps aux composants de protection pour agir.

En connaissant cette durée et la valeur du courant de court-circuit on peut établir les contraintes de tenues thermiques et mécaniques. En effet, les contraintes de tenue thermique sont données dans la norme CEI-60076-5 [CEI-765], quant-aux contraintes de tenue mécanique elles seront établies plus tard en fonction de l'intensité du courant de court-circuit, ce qui fait l'importance de sa bonne estimation.

Un transformateur dont le secondaire est en court-circuit et le primaire est relié à un réseau de puissance infinie a un courant de court-circuit qui est limité uniquement par son impédance interne. Le schéma électrique équivalent d'un transformateur en court-circuit est donné par :



La tension secondaire à vide est de la forme :

$$v_{s0}(t) = \sqrt{2}V_{s0}\sin(\omega t) \tag{IV.25}$$

En court-circuit la loi des mailles donne :

$$v_{s0}(t) = R_s i_{cc}(t) + L_f \frac{di_{cc}(t)}{dt} \tag{IV.26}$$

La solution à cette équation est la superposition de deux termes dont le premier est un courant sinusoïdal qui représente le courant de court-circuit en régime permanent donné par :

$$i_{cc1}(t) = \frac{\sqrt{2}V_{s0}}{\sqrt{{R_s}^2 + (L_f\omega)^2}} \sin(\omega t - \varphi) \tag{IV.27}$$

et le deuxième est le courant transitoire exprimé comme suit :

$$i_{cc2}(t) = \frac{\sqrt{2}V_{s0}}{\sqrt{{R_s}^2 + (L_f\omega)^2}} \sin(\varphi) e^{\frac{-R_s}{L_f}t} \tag{IV.28}$$

Enfin, l'expression totale du courant de court-circuit résultant est

$$i_{cc}(t) = \frac{\sqrt{2}V_{s0}}{\sqrt{{R_s}^2 + (L_f\omega)^2}} [\sin(\omega t - \varphi) + \sin(\varphi)\, e^{\frac{-R_s}{L_f}t}] \tag{IV.29}$$

La Figure IV.3 montre le courant de court-circuit et ses composantes en régime permanent et transitoire.

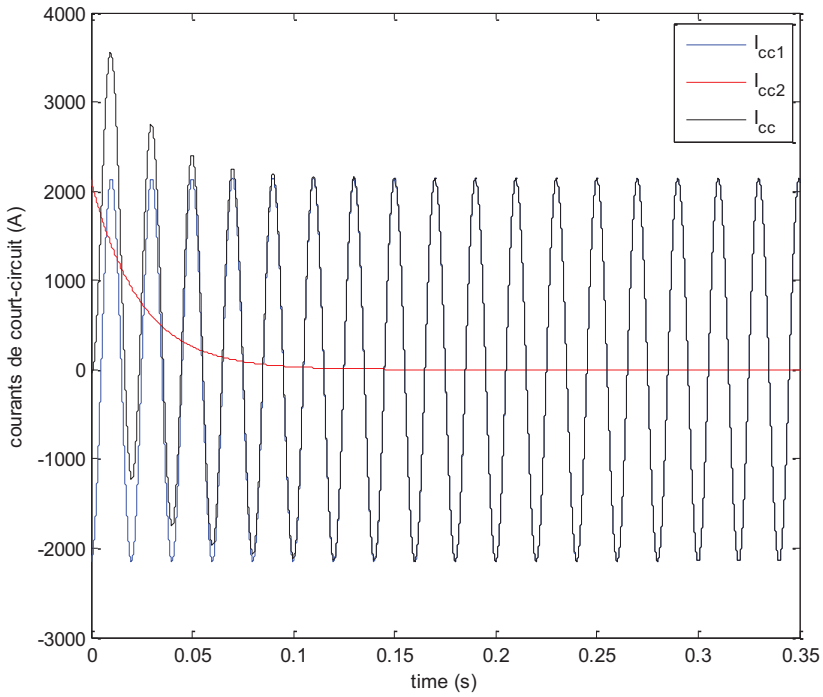


Figure IV.3 : Courant de court-circuit et ces composantes permanent et transitoire obtenus par le modèle

Pour valider le modèle du transformateur nous avons utilisé le logiciel PSIM®. Le schéma de simulation du transformateur en court-circuit est donné dans la Figure IV.4.

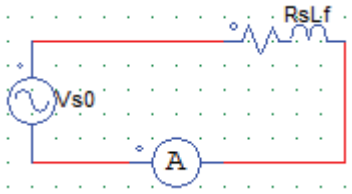


Figure IV.4 : modèle de simulation du court-circuit dans le transformateur de traction

Le courant de court-circuit obtenu est donné dans la Figure IV.5.

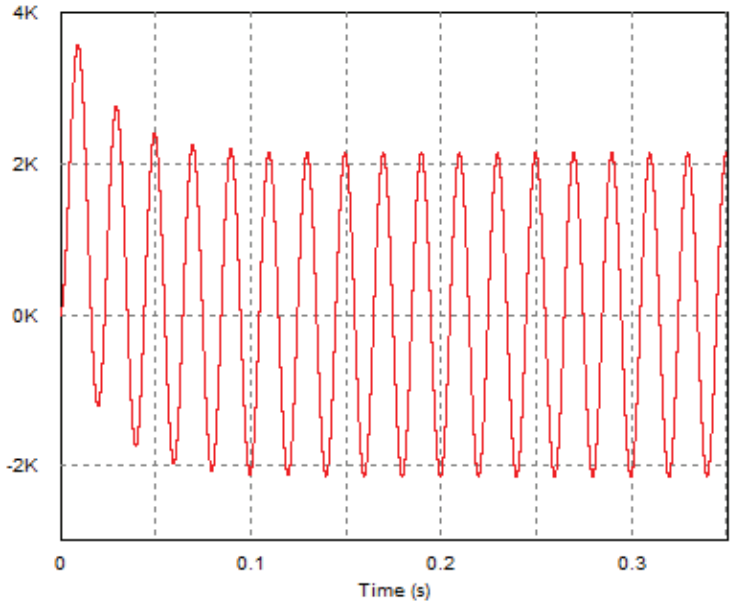


Figure IV.5 : courant de court-circuit obtenu par simulation

Le courant de court-circuit obtenu par la simulation sur PSIM® est parfaitement similaire à celui trouvé par notre modèle du transformateur en court-circuit. Par conséquent nous pourrons déduire que notre modèle est cohérent avec les résultats de simulation de PSIM® pour ce point de fonctionnement.

Electromagnétique

Ce modèle permet de calculer les champs et inductions magnétiques dans le circuit ferromagnétique du transformateur, son inductance magnétisante, les coefficients de couplages entre enroulements, les inductances de fuite, les pertes Joule, les pertes fer, le rendement du transformateur et les éléments du schéma équivalent.

- *Pertes fer*

La modélisation du transformateur tient compte de ses imperfections. Les pertes fer générées dans le circuit magnétique par les harmoniques de tension sont calculées par la formule de Steinmetz.

$$P_{fer} = V_{cm}[k_h f B_m^n + k_f (f B_m)^2] \quad \text{(IV.30)}$$

où V_{cm} est le volume du circuit magnétique et *n* est un réel entre 1.6 et 2. Cette formule a été améliorée en 2002 par Y. Chen et P. Pillay [CHE-02]. Elle permet de mieux prendre en compte la non-linéarité des tôles magnétiques. Elle est donnée, pour chaque harmonique de rang h de fréquence f_h en fonction de l'induction magnétique B_h par :

$$p_h = \alpha f_h B_h^n + \beta (B_h f_h)^2 + \gamma (B_h f_h)^{1.5} \tag{IV.31}$$

où $\alpha, \beta \; et \; \gamma$ sont des coefficients déterminés à partir des caractéristiques des tôles du transformateur.

L'induction B_h est déterminée à partir du spectre harmonique de la tension grâce à la formule de Boucherot par :

$$B_h = \frac{V_h \sqrt{2}}{2\pi n_2 f_h S_{cm}} \tag{IV.32}$$

Avec S_{cm} la section du circuit magnétique ; n_2 est le nombre de spire secondaire ; V_h est l'amplitude de chaque harmonique de tension secondaire et f_h est la fréquence de chaque harmonique ($f_h = h.f$ avec *h* est l'ordre de l'harmonique et f la fréquence du fondamental).

Ainsi les pertes fer totales dans le circuit magnétiques sont calculées par :

$$P_{iron} = V_{cm} \sum_h p_h (f_h) \tag{IV.33}$$

Cette approximation analytique des pertes fer conduit selon Ferreira [FER-00] une surestimation de ces pertes de 5% en moyenne. Dans le cas du transformateur de traction du Tram Train, les pertes fer ne représentent que 2% des pertes totales. Le reste des pertes sont les pertes dans le cuivre.

- *Pertes Joule*

Les pertes Joule dans les conducteurs sont calculées par la formule de Dowell reprise dans [ERI-04]. Cette formule permet de prendre en compte les effets de peau et de proximité dans un enroulement du transformateur pour une fréquence f_h donnée. Elle consiste à calculer dans un premier temps l'épaisseur de peau δ et le rapport φ entre l'épaisseur radiale des conducteurs *E* et l'épaisseur de peau δ comme suit:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 f_h}} \tag{IV.34}$$

$$\varphi = \frac{E}{\delta} \tag{IV.35}$$

Ensuite, les deux fonctions $G_1(\varphi) \; et \; G_2(\varphi)$ sont calculées par :

$$G_1(\varphi) = \frac{\sinh(2\varphi) + \sin(2\varphi)}{\cosh(2\varphi) - \cos(2\varphi)} \tag{IV.36}$$

$$G_2(\varphi) = \frac{\sinh(2\varphi)\cos(\varphi) + \cosh(\varphi)\sin(\varphi)}{\cosh(2\varphi) - \cos(2\varphi)} \tag{IV.37}$$

Le coefficient F_R et les pertes Joule sont déterminés pour chaque couche *m* (la couche la plus proche du noyau correspond à *m*=1) par :

$$F_R = \frac{R_{ac-couche}}{R_{dc-couche}} = m(m-1)(2G_1(\varphi) - 4G_2(\varphi)) + G_1(\varphi) \tag{IV.38}$$

$$P_{j_couche} = F_R R_{dc_couche} {I_s}^2 \tag{IV.39}$$

où $R_{dc-couche}$ est la résistance en courant continu de chaque couche *m*. Les pertes Joule totales sont la somme des pertes dans toutes les couches comme il est montré dans (IV.40).

$$P_{copper} = \sum_{m=1}^{n_c} F_R R_{dc_couche} {I_s}^2 \tag{IV.40}$$

avec n_c est le nombre de couches.

- *Inductances de fuite*

Pour le calcul des inductances de fuite, nous avons adopté la formule de Dowell [DOW-66]. Elle détermine la valeur de l'inductance de fuite à basse fréquence, dans les différentes parties de l'enroulement du transformateur (conducteurs, canaux de refroidissement, écran électrostatique) en fonction du nombre de couches et des paramètres géométriques de la bobine.

$$L_{f_cond} = \frac{\mu_0 n_c^3 n_{sp_c}^2 l_{sp} E}{3 h_{enr}} \tag{IV.41}$$

$$L_{f_canaux} = \mu_0 n_{sp} l_{sp} n_{canaux} \frac{e_{canal1}}{3 h_{enr}} . \left(1 - \frac{1}{2 n_{canaux}}\right) \tag{IV.42 }$$

où *E* est l'épaisseur radiale du conducteur, n_{sp_c} le nombre de spires par couche, l_{sp} la longueur moyenne d'une spire, n_{sp} le nombre totale de spires dans l'enroulement, h_{enr} la hauteur d'un enroulement, n_{canaux} le nombre de canaux et e_{canal1} l'épaisseur d'un canal d'huile.

L'inductance de fuite dans l'écran se calcule d'une manière similaire à celle d'un canal. La bonne estimation de l'inductance de fuite du transformateur est indispensable pour calculer l'ondulation de courant et la valeur maximale du courant commuté dans les IGBT. En effet, le rôle de l'inductance de fuite est de limiter l'ondulation du courant dans un secondaire du transformateur, cette relation est exprimée dans [AHM-07] par :

$$\Delta I_{max}^{crête} = \frac{V_{DC}}{8.L_f.F_p} \tag{IV.43}$$

où V_{DC} est la tension du bus continu et F_p est la fréquence de commutation dans les IGBT du PMCF.

Lorsque le courant est composé de plusieurs harmoniques de hautes fréquences. La valeur de l'inductance de fuite dans les conducteurs varie avec un coefficient F_L [DOW-66]. Ce coefficient est calculé à partir des fréquences des harmoniques et des paramètres géométriques et physiques des conducteurs. L'expression de F_L est donnée dans (IV.47).

$$\alpha_i = \sqrt{\frac{\rho}{2j\mu_0\pi f}} \tag{IV.44}$$

$$\varphi_i = \frac{d}{\alpha_i} \tag{IV.45}$$

$$soit\ MM = \varphi_i coth\varphi_i\ et\ DD = 2\varphi_i \tanh(\frac{\varphi_i}{2}) \tag{IV.46}$$

$$F_L = \frac{1}{n_c^2\varphi^2}(3Img(MM) + (n_c^2 - 1)Img(DD) \tag{IV.47}$$

Dans les formules (IV.44), *j* est le nombre imaginaire tel que $j^2 = -1$.

Le transformateur est également modélisé par une résistance et inductance magnétisante au primaire. Toutes les inductances de fuite et les résistances des enroulements ont été ramenées au secondaire comme montré en Figure IV.6.

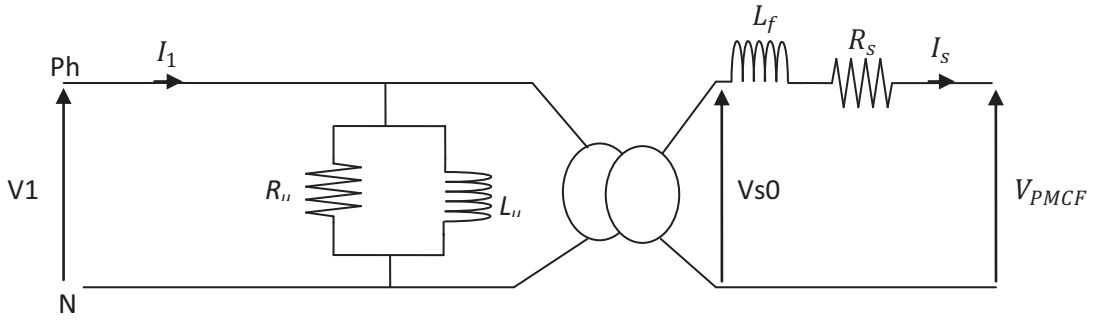


Figure IV.6 : Schéma électrique équivalent du transformateur de traction

- *Coefficient de couplage*

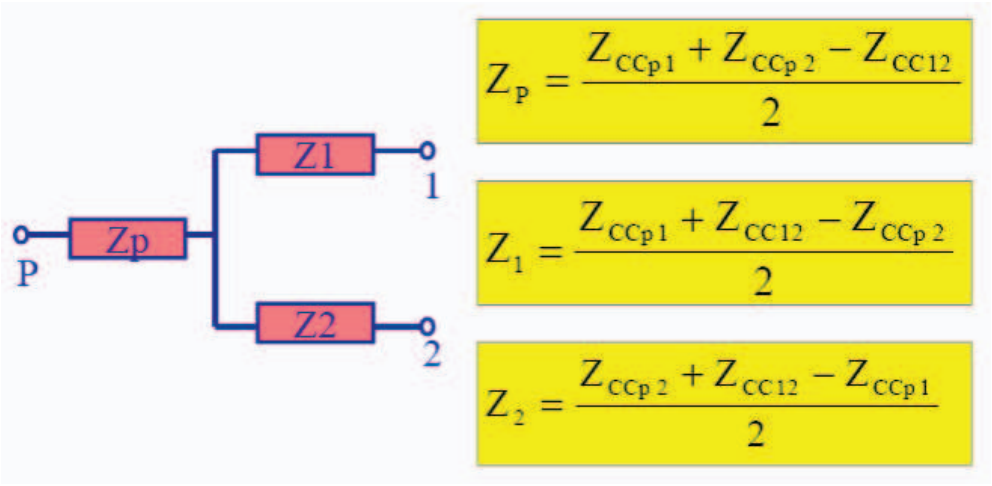
Le transformateur contient 6 enroulements secondaires. Un couplage magnétique imparfait entre ces enroulements a été considéré par les formules élaborées dans [KAZ-09].

Les coefficients de couplage représentent le couplage entre les selfs de fuite des différents secondaires (entre -1 et +1), il faut qu'ils soient proches de 0 pour minimiser les courants crêtes des PMCF.

Si le couplage est positif, on augmente les courants circulant entre les PMCF (harmoniques PMCF en opposition de phase éliminés du courant caténaire) et on diminue les courants allant à la caténaire (harmoniques PMCF en phase).

Si le couplage est négatif, on diminue les courants circulant entre PMCF et on augmente les courants allant à la caténaire (réduction d'impédance vers la caténaire).

Le couplage peut être représenté par un diagramme en T [DEB-06] ci-dessous, où l'impédance commune entre 2 secondaires est représentée par Zp, de même signe que le Cij.



Thermique

Le modèle thermique est très important dans le transformateur. En effet, dans les transformateurs embarqués, les contraintes thermiques associées à des contraintes de masse sont souvent celles qui limitent le concepteur. Le modèle élaboré est capable de calculer la température dans chaque couche de conducteur ainsi que les températures haute, moyenne et basse de l'huile en régime permanent.

Chaque couche est modélisée par quatre résistances thermiques qui sont celles des conducteurs et des isolants entre couche. Les pertes Joule dans chaque couche sont modélisées par des sources de courant. La Figure IV.7 montre le schéma thermique équivalent d'une agglomération de *M* couches situées entre deux canaux d'huile.

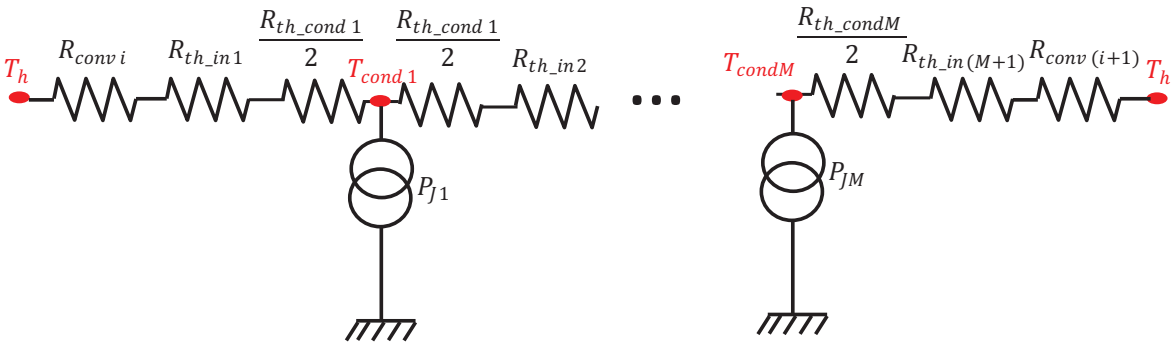


Figure IV.7 : Schéma thermique équivalent d'une agglomération de couche dans un enroulement

où T_h représente la température d'huile dans les canaux, $R_{th_condj}\ j = 1..M$ sont les résistances thermiques des fils conducteurs, $R_{th_inj}\ j = 1..M+1$ sont les résistances thermiques des couches d'isolants, $T_{condj}\ j = 1..M$ sont les températures des couches, $P_{Jj}\ j = 1..M$ sont les pertes Joules dans chaque couche de conducteurs et R_{conv} la résistance thermique de convection de chaque groupe de conducteur.

Le modèle est complexe car les caractéristiques de l'huile utilisée pour le refroidissement (conductivité thermique, chaleur massique, viscosité, masse volumique) dépendent de la température des couches avec lesquelles elle est en contact. La température de ces couches dépend elle-même de la température de l'huile.

Pour effectuer le calcul des différentes températures, il faut commencer par le calcul du coefficient de convection pour les surfaces en contact avec l'huile. Pour ceci il faut tout d'abord déterminer les paramètres suivants :

$$Re = \frac{V_h D_{eq}}{v_h(T_h)} \tag{IV.48}$$

$$Pr = \frac{Cp_h(T_h) v_h(T_h) mv_h(T_h)}{\lambda_h(T_h)} \tag{IV.49}$$

$$v_{dh_b} = mv_h(T_h) v_h(T_h) \tag{IV.50}$$

$$v_{dh_cond} = mv_h(T_{cond}) v_h(T_{cond}) \tag{IV.51}$$

où $Re\ et\ Pr$ sont respectivement, le nombre de Reynolds et le nombre de Prandlt. $Cp_h, mv_h, v_h\ et\ \lambda_h$ sont respectivement le coefficient de la chaleur massique, la masse volumique, la viscosité et la conductivité thermique de l'huile qui dépendent tous de la température. Les variations de ces paramètres en fonction de la température sont données par le fournisseur de l'huile. $v_{dh_b}\ et\ v_{dh_cond}$ sont les viscosités dynamiques de l'huile dans la cuve et à la surface d'un conducteur, V_h est la vitesse moyenne de l'huile dans les canaux et D_{eq} est le diamètre hydraulique d'un canal.

Le diamètre hydraulique pour un canal de forme géométrique quelconque est donné par :

$$D_{eq} = \frac{4S}{P_m} \tag{IV.52}$$

Avec S est la section du canal et P_m est son périmètre mouillé. Donc, pour un canal de forme annulaire de rayon interne r_2 et de rayon externe r_1, comme il est indiqué dans la Figure IV.8, le diamètre hydraulique est :

$$D_{eq} = \frac{4\pi({r_1}^2 - {r_2}^2)}{2\pi(r_1 + r_2)} = 2e_{canal} \tag{IV.53}$$

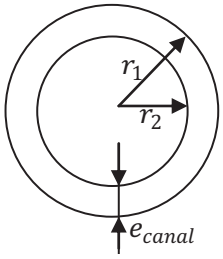


Figure IV.8 : section d'un canal d'huile dans le transformateur

Les équations (IV.48)-(IV.51) forment un système non-linéaire traité à l'aide d'une boucle itérative. En effet, les modèles thermique et mécanique des fluides ne peuvent fournir les résultats sans ces paramètres. Il est donc nécessaire d'avoir une boucle permettant de vérifier que les paramètres fournis à l'origine sont égaux aux paramètres calculés dans le modèle. Le processus itératif permet de s'assurer que tel est le cas.

Ensuite, les nombres de Nusselt calculés sur chaque surface de contact sont donnés par :

Si $Re < 2000$ et $\left(\frac{h_{enr}}{RePrD_{eq}}\right) < 0.026$ (cas d'un écoulement laminaire). Le nombre de Nusselt est donné dans (IV.54).

$$Nu = 2.44\left(\frac{h_{enr}}{RePrD_{eq}}\right)^{-\frac{1}{3}}\left(\frac{v_{dh_b}}{v_{dh_cond}}\right)^{0.14} \tag{IV.54}$$

Si $\left(\frac{h_{enr}}{RePrD_{eq}}\right) \geq 0.026$ (écoulement turbulent) ce nombre est donné par (IV.55)

$$Nu = 8.2\left(\frac{v_{dh_b}}{v_{dh_cond}}\right)^{0.14} \tag{IV.55}$$

Enfin, les coefficients de convection h et les résistances thermiques R_{th_conv} de convection peuvent être calculés par :

$$h(T_h) = \frac{\lambda_h(T_h)Nu}{D_{eq}} \tag{IV.56}$$

$$R_{th_conv}(T_h) = \frac{1}{h(T_h)S_{contact}} \tag{IV.57}$$

Les formules (IV.48) à (IV.57) montrent que tous les paramètres dépendent de la température de l'huile qui influe la température des conducteurs. Les détails de calcul et les démonstrations des formules utilisées peuvent être trouvées dans [PYR-08], [SWI-01a], [SWI-01b], [PAR-03], [OLI-80] et [RYD-02].

En court-circuit, un des enroulements du transformateur est parcouru par le courant I_{cc} estimé dans le modèle du transformateur en court-circuit. Pour calculer la température moyenne des conducteurs associée aux pertes engendrées par ce courant pendant 3s nous adaptons la formule donnée pour le cuivre dans la norme CEI-60076-5 [CEI-765] par :

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2(\theta_0 + 235)}{\frac{106000}{J^2.Tcc} - 1} \tag{IV.58}$$

Pour l'aluminium l'expression est donnée par :

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2(\theta_0 + 225)}{\frac{45700}{J^2.Tcc} - 1} \tag{IV.59}$$

pour l'aluminium, où θ_0 est la température initiale de l'enroulement, J est la densité de courant en court-circuit, en A/mm², basée sur la valeur efficace du courant de court-circuit, et Tcc est la durée de court-circuit en seconde.

Toutes les pertes du transformateur calculées dans la suite de ce chapitre sont exprimées à la température maximale atteinte dans le régime nominal.

Mécanique des fluides

Le modèle mécanique des fluides est indispensable dans le dimensionnement du transformateur car il permet de déterminer la vitesse de l'huile dans les canaux. Cette vitesse est très importante dans le calcul des coefficients de convection et par conséquent dans le calcul des températures des enroulements et du circuit magnétique du transformateur.

D'autre part, ce modèle est aussi indispensable au dimensionnement de la pompe qui fait circuler le fluide. En effet, le modèle mécanique des fluides permet d'estimer les pertes de pression que la pompe doit vaincre. Ces pertes sont de deux types. Le premier type est lié à la forme géométrique de la conduite (coude, cône, branchement amenée, etc.). Ces pertes sont appelées pertes de pression singulières. Le deuxième type de pertes appelées, aussi pertes de pression par frottements réguliers, sont liées aux caractéristiques du fluide comme sa viscosité et sa masse volumique et à la rugosité du canal.

Dans le cas du transformateur nous allons étudier uniquement les pertes de pression par frottements réguliers (P_{charge}) dans les canaux de refroidissement et nous avons négligé les pertes de pression singulières car les canaux sont considérés parfaitement droits. Nous allons faire l'hypothèse que la pompe crée un débit constant. Avec cette hypothèse on risque de voir l'épaisseur des canaux diminue afin d'augmenter la vitesse et par conséquent le coefficient de convection. Mais dans notre cas nous avons les contraintes de l'écoulement laminaire qui viennent limiter ce risque.

Le calcul des pertes de pression par frottements réguliers dans un tube est donné en fonction de son diamètre hydraulique D_{eq} et de sa longueur L par :

$$P_{charge} = \Lambda \frac{L}{D_{eq}} \rho \frac{v^2}{2} \tag{IV.60}$$

où Λ est le coefficient de Darcy, ρ est la masse volumique du fluide et v est sa vitesse de circulation.

En fonction du débit, cette relation peut s'écrire :

$$P_{charge} = \frac{\rho}{2S^2}\left(\Lambda \frac{L}{D_{eq}}\right)\dot{D}^2 = Z\dot{D}^2 \tag{IV.61}$$

Z est le coefficient du canal et il s'exprime en $kg.m^{-7}$[FRI-99].

Dans le transformateur de traction nous avons plusieurs canaux en parallèle. Pour chaque canal nous associons un coefficient Z_i et nous appelons $\dot{D}$ le débit d'huile imposé par la pompe. Donc, le schéma hydraulique équivalent de notre transformateur peut être représenté par la Figure IV.9.

Avec ce schéma on peut calculer le débit dans chaque canal par :

$$\dot{D}_i = \dot{D}\sqrt{\frac{Z_i}{Z}} \tag{IV.62}$$

où Z est calculé par :

$$\frac{1}{Z} = \left(\sum_{i=1}^{n_canaux} \sqrt{\frac{1}{Z_i}}\right)^2 \tag{IV.63}$$

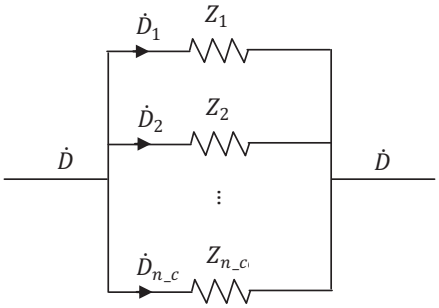


Figure IV.9 : Modèle mécanique des fluides pour les canaux de refroidissement du transformateur

En déterminant les coefficients Z_i des canaux on peut déduire le coefficient global Z du transformateur et en déterminant les débits $\dot{D}_i$ on peut déduire les vitesses d'écoulement dans les canaux.

Pour alléger notre modèle, nous allons considérer que la vitesse dans les canaux est la même puisqu'ils ont tous la même épaisseur (le même diamètre hydraulique). La vitesse globale du fluide est exprimée dans (IV.64).

$$v = \frac{\dot{D}}{\sum S_i} \tag{IV.64}$$

Vieillissement

Le vieillissement du transformateur est dû principalement aux phénomènes thermiques dans celui-ci. Sa durée de vie est liée souvent à celle des isolants utilisés dans les conducteurs. Généralement, les fabricants des isolants fournissent des courbes qui expriment la durée de vie de leur produit en fonction de leur température de fonctionnement comme il est montré dans la Figure IV.10.

Continue confidentielle

Figure IV.10 : Evolution de la durée de vie des isolants Nomex en fonction de leur température

Environnemental

Le modèle environnemental du TT est construit à l'aide du logiciel EIME®, version 4.0 et sa base de données version 10.0. Il permet de calculer les onze impacts environnementaux à partir de : la durée de vie *LD* du transformateur, les quantités de matériaux utilisés et les pertes (fer (P_{iron}) et Joule (P_{copper})) pendant la phase d'utilisation du TT. La formule utilisée est celle présentée dans [RBA-10] et est donnée dans (IV.65).

$$Im_i = \alpha_{Watt}^i . LD\left[\beta_1 . P_{copper} + (\beta_1 + \beta_2) P_{iron}\right] + \sum_{mat} \alpha_{kg}^i . M_{mat} \tag{IV.65}$$

où Im_i est l'un des indices d'impacts calculés par EIME® ; α_{mat}^i est la valeur de Im_i calculé pour 1 kg du matériau (mat) ; M_{mat} est la masse du matériau mat en kg ; α_{Watt}^i est la valeur de Im_i calculé par EIME® pour la consommation de 1 Watt durant une année. β_1 et β_2 représentent respectivement les pourcentages de fonctionnement du TT en pleine charge et à vide.

Mécanique

Le modèle mécanique est élaboré dans le but de calculer les forces électromagnétiques appliquées sur les enroulements du transformateur en court-circuit. Dans le cas du

transformateur du Tram Train, nous avons des enroulements concentriques qui présentent une symétrie suivant l'axe de révolution (axe du circuit magnétique). Donc, les forces électromagnétiques sont uniformes sur la circonférence l de l'enroulement et il suffit de calculer la force par élément de circonférence dl, voir Figure IV.11.

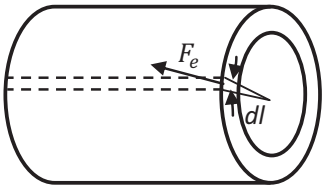


Figure IV.11 : Force exercée par élément de circonférence sur la paroi de l'enroulement

Par élément de circonférence, les forces électromagnétiques sont basées sur la formule de Laplace :

$$d\overrightarrow{F_e} = idx.\overrightarrow{dl} \wedge \vec{B}(x) \tag{IV.66}$$

où idx représentent le courant par élément d'épaisseur de l'enroulement et $\vec{B}$ l'induction magnétique dans les enroulements du transformateur.

Pour le calcul de ces forces, nous allons faire l'hypothèse que les flux de fuites sont axiaux et que les Ampères-tours sont uniquement consommés dans et entre les enroulements. Par conséquence, l'induction varie linéairement dans le sens radial [SEG-94]. Avec cette hypothèse, nous avons un vecteur de courant perpendiculaire à celui de l'induction et la force électromagnétique est donc perpendiculaire à la paroi des enroulements comme le montre la Figure IV.12.

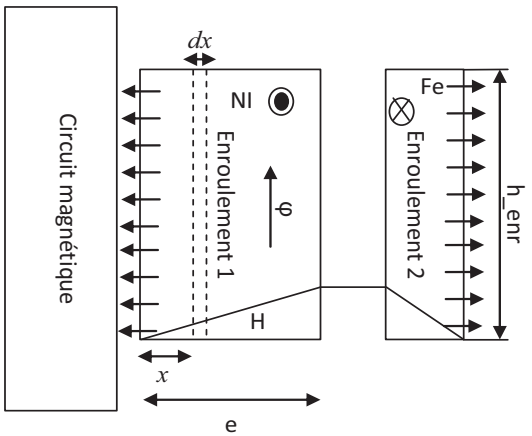


Figure IV.12 : Force électromagnétique exercées sur les enroulements du transformateur par élément de circonférence

Suite aux hypothèses faites, la formule de Laplace dans l'enroulement 1 est simplifiée par

$$\frac{dF_e}{dl} = \frac{NI}{e} dx.\mu_0 \frac{NI}{h_enr}.\frac{x}{e} \tag{IV.67}$$

où N et I sont respectivement le nombre de spires et le courant dans un enroulement et h_enr est la hauteur de l'enroulement.

En intégrant l'expression précédente de zéro à *e*, on obtient la force totale par unité de circonférence [PIC-65] :

$$F_e = \mu_0 \frac{(NI)^2}{2h_enr} \ (N/m) \tag{IV.68}$$

Avec la convention des courants prises sur la Figure IV.12, cette force tend à faire éclater l'enroulement extérieur et à écraser l'enroulement intérieur sur le noyau. Lorsque les courants sont inversés le sens des forces électromagnétiques s'inverse, et ainsi de suite. Ce phénomène entraine un frottement au niveau des conducteurs qui provoque l'usure de leurs isolants.

Pour empêcher l'usure des isolants, il faut que la section des conducteurs soit bien dimensionnée pour avoir une rigidité suffisante. Pour avoir la relation entre les forces électromagnétiques et la section des câbles, nous nous sommes inspirés du dimensionnement de la paroi d'une chaudière cylindrique [PIC-65], connue aussi par la formule des chaudières [PEL-88], comme il est montré dans la Figure IV.13.

Pour une section longitudinale du cylindre sous pression (contrainte circonférentielle):

$$\sigma_m = \frac{p.r}{e} \tag{IV.69}$$

Avec *p* est la pression du fluide dans la chaudière, *r* est son rayon et *e* l'épaisseur de sa paroi.

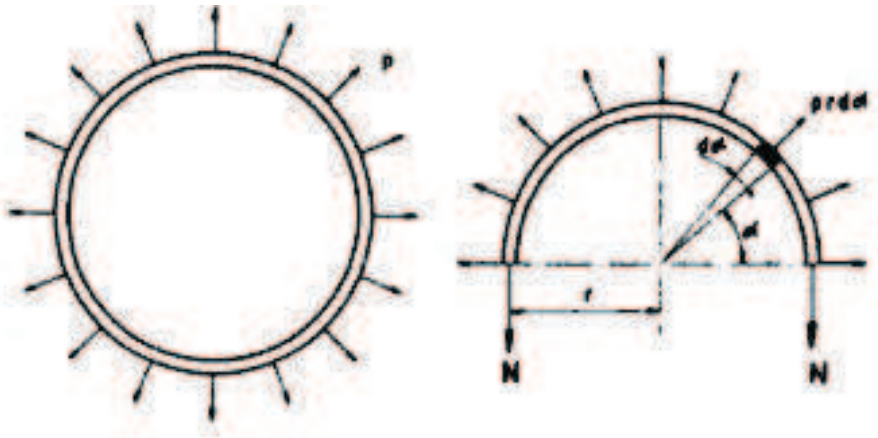


Figure IV.13 : pression exercée sur les parois d'une chaudière cylindrique [PEL-88]

Pour appliquer cette formule sur notre enroulement concentrique, on pose *s* la section d'une spire et *r* le rayon moyen d'un enroulement. Ainsi, la pression qui s'exerce sur sa paroi est donnée par :

$$p = \frac{F_e}{h_enr} \tag{IV.70}$$

La valeur de la pression maximale supportée par un enroulement dépend des matériaux des conducteurs et de sa fabrication. Les valeurs trouvées dans la littérature [PIC-65] pour cette pression sont respectivement de 60 et 30 MPa pour les enroulements en cuivre et en aluminium.

La contrainte circonférentielle de l'enroulement en aluminium peut alors s'exprimer par :

$$\sigma_m = \frac{p.r}{e} = \frac{F_e.r}{Ns} \leq 30\ MPa \qquad \text{(IV.71)}$$

Dans le cas du transformateur étudié, l'application de cette contrainte sur le dernier groupe de couches au primaire est suffisante car le module des forces électromagnétiques est maximal sur ces dernières couches (NI maximale). Donc, il suffit de remplacer N par n_1, I par I_s et r par le rayon moyen du dernier groupe de couches dans (IV.71).

Comparaison avec les mesures

La comparaison des résultats fournis par les modèles avec les mesures faites sur le dispositif réel est communément utilisée pour valider les modèles élaborés. Bien qu'une adéquation des résultats ne soit pas la preuve de la validité des modèles, elle permet de conforter leur pertinence et de justifier leur utilisation dans le cadre d'une conception par optimisation. L'analyse des résultats de l'optimisation pourra éventuellement aboutir sur une remise en cause partielle de certains modèles.

Géométrie

Le modèle géométrique calcule les différentes quantités de matériaux utilisés dans le transformateur qui sont notamment des entrées du modèle environnemental.

Le Tableau IV.1 montre que le modèle géométrique du transformateur estime avec une bonne précision les différentes masses des matériaux utilisés dans le transformateur ce qui confirme que nous avons bien reproduit la géométrie du transformateur.

Electromagnétique

Pour le modèle électromagnétique nous avons commencé par valider le modèle de Dowell pour le calcul des coefficients F_R et F_L utilisés dans l'estimation de la résistance et de l'inductance équivalente d'un enroulement pour des signaux de haute fréquence afin d'estimer les pertes harmoniques.

Pour ce faire, nous avons réalisé un banc d'essai avec une inductance de lissage de 4.5 mH fourni par Trans-Rail et un pont d'impédance (Agilent 4294A) capable de balayer une plage de fréquence allant de 40 Hz à 100 kHz. La comparaison des résultats trouvés par le modèle avec les mesures est montrée dans la Figure IV.14 pour F_R et dans la Figure IV.15 pour F_L.

Tableau IV.1 : Comparaison des quantités des matériaux calculées par le modèle et celles dans le transformateur actuel

Matériaux	Transformateur actuel	Modèle	Erreur (%)
Masse cuivre/enr (u.r.)	1	0.97	2.95
Masse aluminium/enr (u.r.)	1	0.99	0.56
Masse nomex/enr (u.r.)	1	0.99	0.8
Masse papier phénoplaste (u.r.)	1	1.01	1.34
Masse acier magnétique (u.r.)	1	1.01	0.58
Masse huile (u.r.)	1	0.99	0.1
Masse cuve (u.r.)	1	0.99	0.27
Masse couvercle (u.r.)	1	0.99	0.12
Masse papier kraft (u.r.)	1	0.96	4.1
Masse TT (u.r.)	1	0.98	1.97
Volume de la cuve (u.r.)	1	0.99	0.25

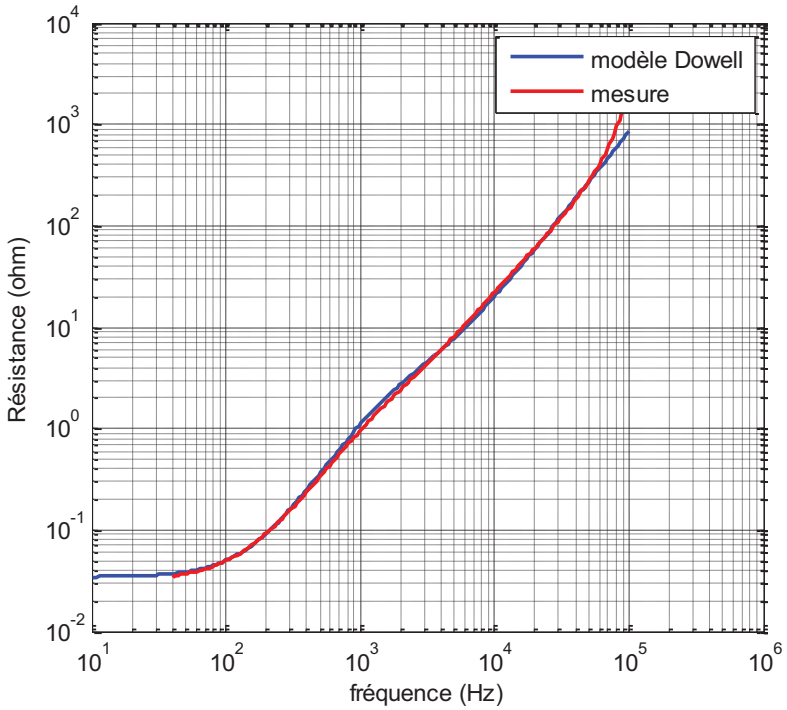


Figure IV.14 : Comparaison du modèle du Dowell aux mesures de la résistance pour une inductance de lissage

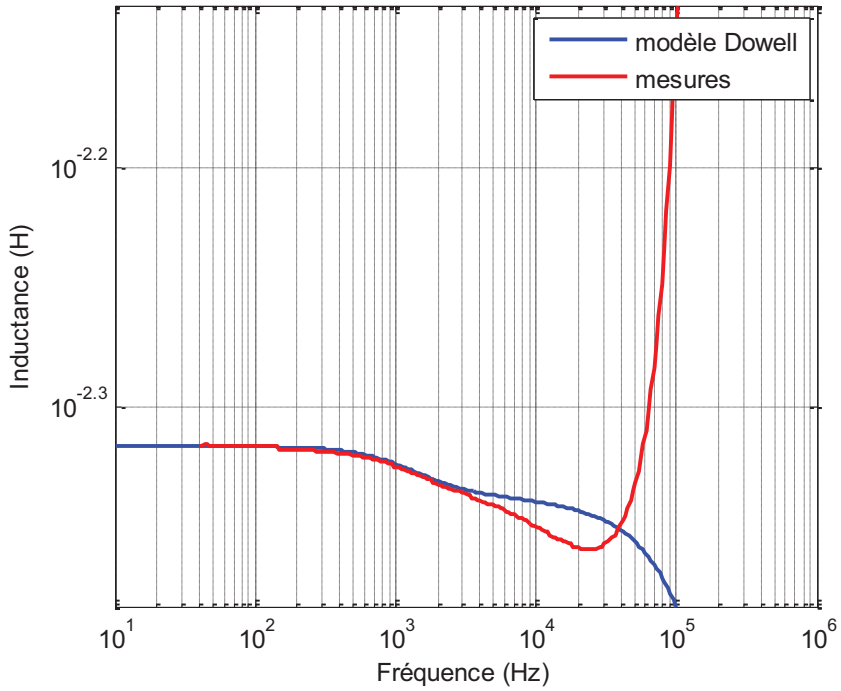


Figure IV.15 : Comparaison du modèle de Dowell aux mesures de l'inductance pour une inductance de lissage

La Figure IV.14 montre que l'estimation de la résistance avec le modèle de Dowell coïncide avec les mesures faites sur le banc d'essai jusqu'à une fréquence de 100 kHz. Ce qui signifie que notre modèle pour le calcul de la résistance de l'enroulement est fiable pour des courants ayant des fréquences allant jusqu'à 100 kHz.

La Figure IV.15 montre une divergence entre les mesures et les résultats du modèle à partir d'une fréquence de 23 kHz. Cette divergence est provoquée par le phénomène de résonance dans la bobine de lissage. En effet, au-delà de 13 kHz, l'aspect capacitif dans la bobine n'est plus négligeable. Au-delà de cette fréquence, la bobine de lissage se comporte comme un circuit RLC qui possède une fréquence de résonance estimée dans le cas de cette bobine à 21 kHz. Pour notre modèle élaboré pour l'estimation de l'inductance nous considérons qu'il fiable jusqu'à 13 kHz, ce qui est bien supérieur aux fréquences de commutation utilisées.

Le modèle de Dowell est utilisé dans le modèle électromagnétique du transformateur pour calculer les pertes dans les conducteurs et l'inductance de fuite totale d'un enroulement vue du secondaire. Le modèle électromagnétique est aussi utilisé pour calculer d'autres paramètres dont les plus importants sont affichés dans le Tableau IV.2.

Le Tableau IV.2 montre que notre modèle surestime les pertes fer dans le circuit magnétique de 5.36%. Ceci est prévu car il est indiqué dans la littérature [FAS-09] que la formule de Steinmetz utilisée surestime ces pertes en présence d'harmoniques.

Un grand écart plus important est constaté entre les pertes Joule calculées par notre modèle et la valeur mesurée. En effet, pour le transformateur existant, les pertes harmoniques dans un enroulement sont estimées par la norme CEI 61378-2 qui présente une formule

simplifiée pour le calcul des pertes supplémentaires dues aux harmoniques de courant et aux effets de proximités alors que notre modèle utilise la formule de Dowell.

Tableau IV.2 : Comparaison paramètres calculées par le modèle électromagnétiques à ceux mesurées sur transformateur existant

Paramètres	Transformateur actuel	Modèle	Erreur (%)
Resistance pr. (u.r.) (à 145°C)	1	0.99	1.00
Resistance sc. (u.r.) (à 145°C)	1	0.99	0.95
Pertes Joule (fondamentale) (u.r.)	1	0.99	0.47
Pertes Joule dans Enr.1 (traction + auxiliaire) (u.r.)	1	0.86	13.84
Pertes fer (u.r.)	1	0.95	5.36
L_f (u.r.)	1	0.99	1.11
Pertes transfo totales (u.r.)	1	0.92	8
Rendement transfo (u.r.)	1	0.99	0.4

La comparaison des résultats obtenus par la norme CEI-61378-2 et ceux obtenus par la formule de Dowell montre que, dans le cas du transformateur du Tram Train, la norme sous-estime les pertes harmoniques de 0.6% de la puissance de l'enroulement.

Thermique

Le modèle thermique est le modèle le plus important et le plus difficile à élaborer dans le transformateur. En effet, toutes les grandeurs physiques dans le transformateur sont dépendantes de la température de ses matériaux comme il est montré dans les différentes équations gouvernantes de ce modèle.

Pour valider le modèle thermique du TT nous avons comparé les différentes températures estimées à des mesures réalisées sur le transformateur existant. L'écart entre les différentes températures est donné en °C dans le Tableau IV.3.

Les températures calculées par le modèle du transformateur sont précises. Le plus grand écart est sur la température moyenne de l'enroulement primaire. En effet, le calcul de la température des enroulements dans le modèle est fait avec l'hypothèse que la vitesse de l'huile est homogène dans tous les canaux. Or en réalité, la vitesse de l'huile dans certains canaux peut être supérieure à cette valeur, donc ces canaux ont un coefficient d'échange thermique supérieur à celui calculé par notre modèle. La sous-estimation de ce coefficient

engendre une surestimation des températures de certaines couches de conducteurs au primaire par conséquent la température moyenne de l'enroulement. Dans le cas du transformateur actuel, la surestimation de la température ne dépasse pas 4.22 °C. Donc, nous pouvons conclure que notre modèle analytique est valable pour ce transformateur.

Tableau IV.3: Comparaison des températures calculées par le modèle et celles mesurées sur le transformateur existant

Grandeurs	Ecart (°C)
T_huile_basse (°C)	0.3 °C
T _huile haute (°C)	0.39 °C
T _huile moy (°C)	0.12 °C
T_moyen_enr primaire (°C)	4.22 °C
T_moyen_enr secondaire (°C)	0.11 °C

Le calcul des différentes températures montrées dans le Tableau IV.3 est fait avec les pertes calculées par la formule de Dowell. La précision de ces températures justifie encore une autre fois la validité de notre modèle électromagnétique.

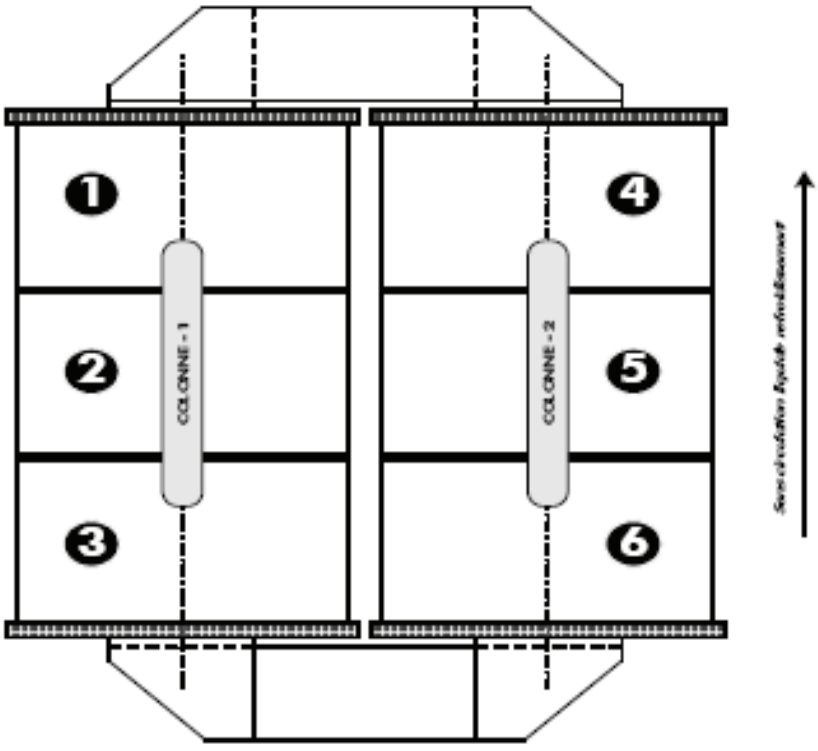


Figure IV.16 : Vue de face du transformateur de traction et indication du sens de l'écoulement de l'huile

Vieillissement

Dans le cas du transformateur, la température de la couche la plus chaude au primaire en régime nominal est estimée avec notre modèle à 90 °C environ. En déterminant la résistance thermique entre l'isolant et le conducteur ainsi que le flux de chaleur qui les traverse on peut estimer la température au cœur de l'isolant le plus chaud. A l'aide de la formule indiquée sur la Figure IV.10, la durée de vie des isolants primaire est estimée à 30 ans.

De la même façon, nous avons procédé pour les isolants secondaires et nous avons déterminé les températures des isolants le plus chauds et ensuite leur durée de vie qui est estimée à 37 ans. La durée de vie du transformateur sera la valeur minimale des deux durées de vie estimées.

Le transformateur actuel est conçu pour vivre une trentaine d'année, donc on peut conclure que notre modèle de vieillissement fourni des résultats cohérents avec ceux estimés par le fabricant du TT et que la durée de vie des isolants limite la durée de vie du transformateur.

Environnemental

Les résultats du modèle environnemental sont comparés aux estimations faites avec le logiciel EIME®. Le Tableau IV.4 montre que l'erreur maximale du modèle environnemental (ME) élaboré ne dépasse pas 2^{e}-3% et on peut ainsi conclure qu'il est fiable.

Tableau IV.4: Comparaison des impacts calculés par le modèle environnemental et ceux calculés par EIME®.

Impacts	ME	Erreur (%)
$RMD\ (Y^{-1})$	3.1735e-11	1^{e}-3
$ED(MJ)$	1.9129e7	1.3^{e}-3
$WD\ (dm^3)$	3.13776e6	1.7^{e}-3
$GW(g{\sim}CO_2)$	9.7665e8	1^{e}-3
$OD(g{\sim}CFC_{11})$	84.0200	2^{e}-3
$AT\ (m^3)$	1.8964e11	1.5^{e}-3
$POC(g{\sim}C_2H_4)$	3.4894e5	1.2^{e}-3
$POC(g{\sim}H^+)$	1.5550e5	1^{e}-3
$WT\ (dm^3)$	2.344e8	2.1^{e}-3
$WE(g{\sim}PO_4)$	3.0272e3	1.8^{e}-3
$HWP\ (kg)$	1.5545e4	1^{e}-3

Le ME présente un autre avantage. En effet, ce modèle est malléable c.à.d. qu'il peut être utilisé directement dans un problème d'optimisation alors que le logiciel EIME® requiert une programmation particulière car il n'est pas prévu pour un usage interactif.

Modèle multidisciplinaire

Les différents modèles du transformateur sont combinés en un seul modèle multidisciplinaire comme montré en Figure IV.17.

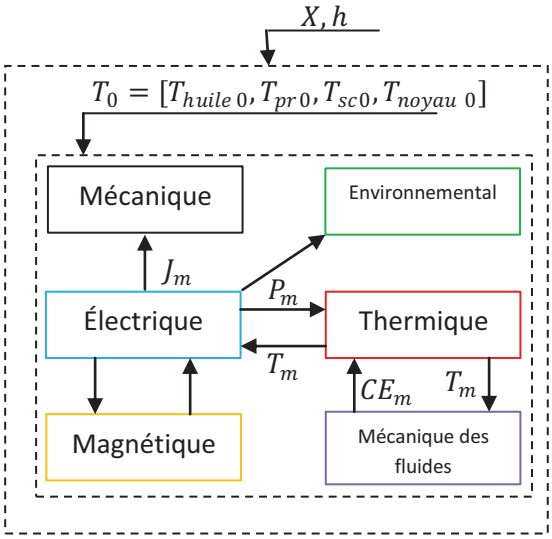


Figure IV.17 : Modèle multidisciplinaire du TT

où $T_0 = [T_{huile0}, T_{pr0}, T_{sc0}, T_{noyau0}]$ est le vecteur T à l'itération initiale. Ce vecteur contient les températures de l'huile, la température moyenne du primaire, la température moyenne du secondaire et la température du noyau. Quant à *h* et *X,* ils représentent respectivement le spectre harmonique de tension renvoyé par le PMCF et les variables géométrique du TT.

Cette figure montre les interactions entre les modèles disciplinaires du TT. Ces interactions sont résolues par la formulation MDF décrite en chapitre 3 combinée avec la méthode du point fixe (PF) pour la résolution des non-linéarités. Cette combinaison est notée par MDF+FP dans la suite. A chaque itération *m*, le modèle multidisciplinaire calcule les températures du vecteur T_m et les compare avec leurs valeurs à l'itération précédente (*m-1*). La méthode du PF s'arrête lorsque (IV.72) est vérifiée.

$$\left|T_{prm} - T_{pr(m-1)}\right| + \left|T_{scm} - T_{sc(m-1)}\right| + \left|T_{noyaum} - T_{noayu(m-1)}\right| + \left|T_{huilem} - T_{huile(m-1)}\right| \leq \varepsilon \quad \text{(IV.72)}$$

Le rôle de la formulation multidisciplinaire est d'assurer la consistance entre les différents modèles élaborés pour le TT. La formulation MDF présente une bonne robustesse et un temps de calcul raisonnable lorsqu'un modèle analytique est utilisé dans l'optimisation comme mentionné dans le chapitre 3. En plus la formulation MDF offre l'avantage de pouvoir calculer les sorties du modèle multidisciplinaire sans avoir recourt à une optimisation, contrairement à la formulation IDF. Il est ainsi possible de valider les différents modèles élaborés. La formulation MDF traite ici les interactions pour un seul composant qui est le transformateur. On parle alors d'une formulation MDF mono-niveau.

IV.4.2. PMCF

Commande du PMCF

Chaque secondaire du transformateur est relié à un redresseur monophasé appelé aussi pont monophasé à commutation forcée (PMCF). Chaque secondaire est représenté par une source de tension, une résistance R_s et une inductance de fuite L_f. Sur le premier bras (bras 1) du PMCF, les signaux de commande des deux IGBT « T1 » et « T2 » sont nommés respectivement $f_{11}(t)\ et\ f_{12}(t)$. Sur le second bras ils sont nommés $f_{21}(t)\ et\ f_{22}(t)$ comme montré dans la Figure IV.18.

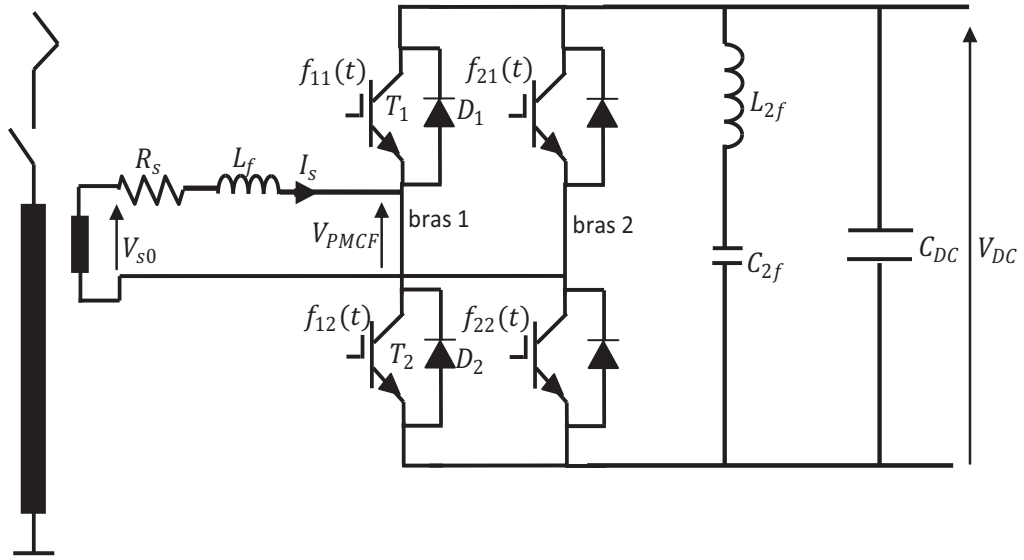


Figure IV.18 : Secondaire d'un transformateur relié à un PMCF

Le principe de fonctionnement consiste à élaborer les commandes des transistors pour régler le fondamental de V_{PMCF} en amplitude et en phase pour avoir I_s et V_{s0} en phase soit un courant primaire quasiment en phase avec la tension caténaire ou encore un $\cos\varphi = 1$ pour le fondamental.

Pour assurer cette régulation, les signaux de commande doivent vérifier les conditions suivantes :

- Les commandes $f_{11}\ et\ f_{12}$ doivent être complémentaires, c.-à-d. $f_{11}(t) = \overline{f_{12}(t)} = 1 - f_{12}(t)$ de même $f_{21}(t) = \overline{f_{22}(t)} = 1 - f_{22}(t)$. Cette condition assure que la capacité C_{DC}, équivalente à une source de tension, ne soit pas court-circuitée et que l'inductance L_f équivalente à une source de courant ne sera pas en circuit-ouvert.

- Le rapport des tensions V_{PMCF} et V_{DC} vérifie l'égalité suivante :

$$\frac{V_{PMCF}}{V_{DC}} = r\sin(\omega t) = \langle f_{11}(t)\rangle_{T_p} - \langle f_{21}(t)\rangle_{T_p} \qquad \text{(IV.73)}$$

où $\langle . \rangle_{T_p}$ désigne la valeur moyenne sur une période de modulation T_p et r est le taux de modulation maximal. Ce taux de modulation est obtenu en fixant, d'abord, les amplitudes des

modulantes et de la porteuse à 1, ensuite les commandes (f_{11} et f_{21}) des deux bras 1 et 2 du PMCF sont générées par une comparaison des 2 modulantes avec la porteuse (cf. Figure IV.19). La différence des deux signaux de commande du bras 1 et 2 donne l'allure de la tension v_{12} entre les deux bras. Enfin, Le taux de modulation maximal est la composante fondamentale de v_{12}.

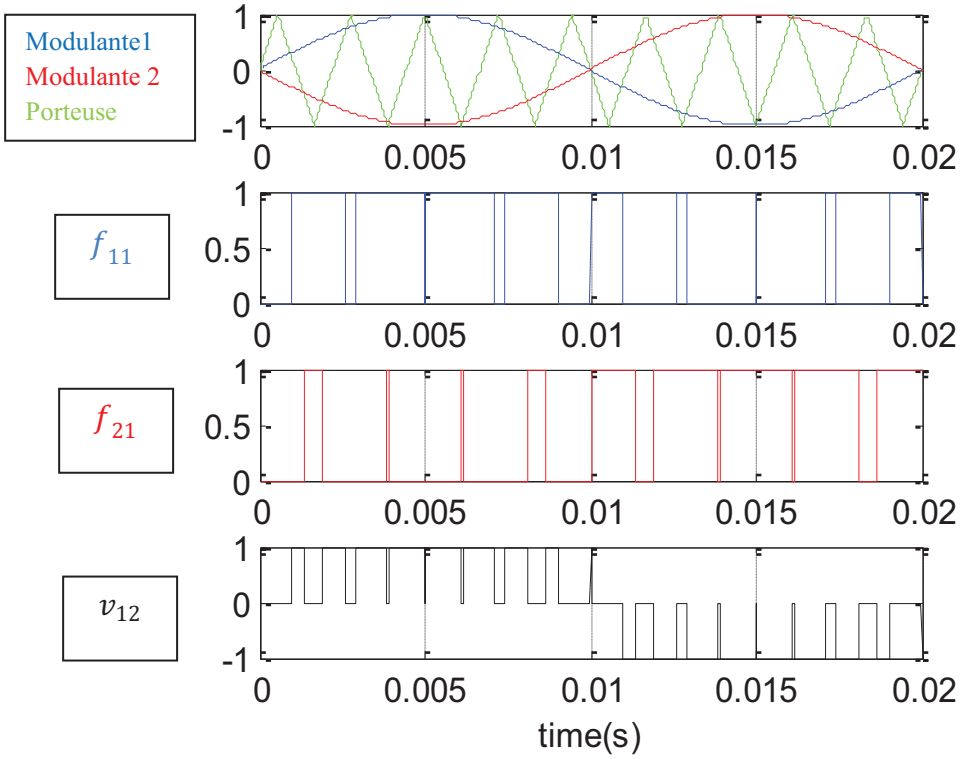


Figure IV.19 : Commande des bras 1 est 2 du PMCF et allure de la tension entre les deux bras pour un rapport unitaire des amplitudes de la modulante et de la porteuse

Pour obtenir un déphasage nul entre la tension secondaire à vide V_{s0} et le courant secondaire I_s, il faut maintenir un angle δ entre V_{s0} et le fondamental de V_{PMCF} comme montré dans le diagramme vectoriel au secondaire du transformateur en Figure IV.20.

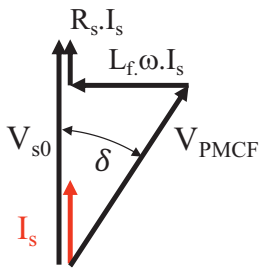


Figure IV.20 : Diagramme vectoriel au secondaire du transformateur

où L_f et R_s sont l'inductance de fuite et la résistance secondaire du transformateur à la fréquence du fondamental.

Ce diagramme permet de déterminer la valeur de l'angle δ comme suit :

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{L_f \omega I_s}{V_s - R_s I_s}\right) \quad \text{(IV.74)}$$

En pratique, la modulante est décalée d'un angle de $-\delta$ par rapport à la porteuse. Donc, les expressions mathématiques des modulantes qui permettent d'obtenir les signaux de commande f_{11} et f_{21} sont données par :

$$\begin{aligned} modulante\ 1(t) &= r sin(\omega t - \delta) \\ modulante\ 2(t) &= -r sin(\omega t - \delta) \end{aligned} \quad \text{(IV.75)}$$

Après le calcul des différents paramètres nécessaires pour les commandes, on obtient les tensions dans les bras 1 et 2 du PMCF ainsi que l'allure de la tension V_{PMCF} entre les 2 bras comme montré dans la Figure IV.21.

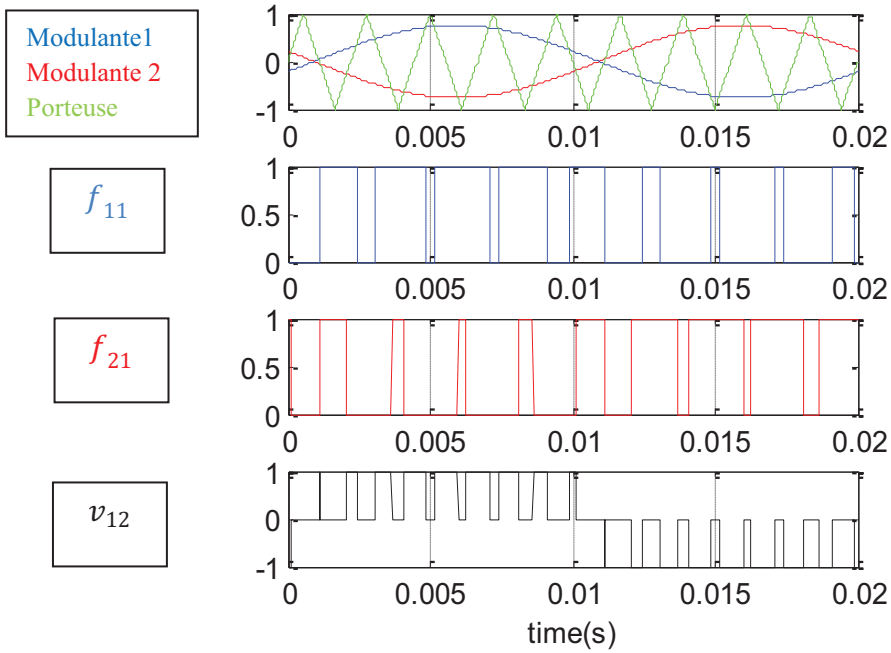


Figure IV.21 : Commande des bras 1 est 2 du PMCF et allure de la tension entre les deux bras

Pertes dans le PMCF

Pour simplifier le calcul, nous nous intéressons à un seul interrupteur dans un bras du PMCF. Le courant électrique de référence pour un secondaire du transformateur de traction est noté par $i_s(t) = \sqrt{2} I_s \sin(\omega t - \varphi_s)$ où I_s est la valeur efficace du courant commuté par les IGBT et φ_s est le déphasage entre I_s et V_s (Vs = V_{s0} et $\varphi_s = 0$ dans notre cas).

Les pertes dans un interrupteur commandé sont de deux types :

- Pertes en conduction
- Pertes par commutation

Pour calculer ces pertes, nous avons utilisé les formules développées dans [DEL-10a] dont les modèles des pertes dans les composants semi-conducteurs ont été validés sur des dispositifs expérimentaux.

Pertes en conduction

Les pertes en conduction sont liées aux chutes de tension aux bornes des interrupteurs à l'état passant. L'énergie dissipée dépend de la valeur du courant transité, de la température de jonction des composants et du rapport cyclique utilisé.

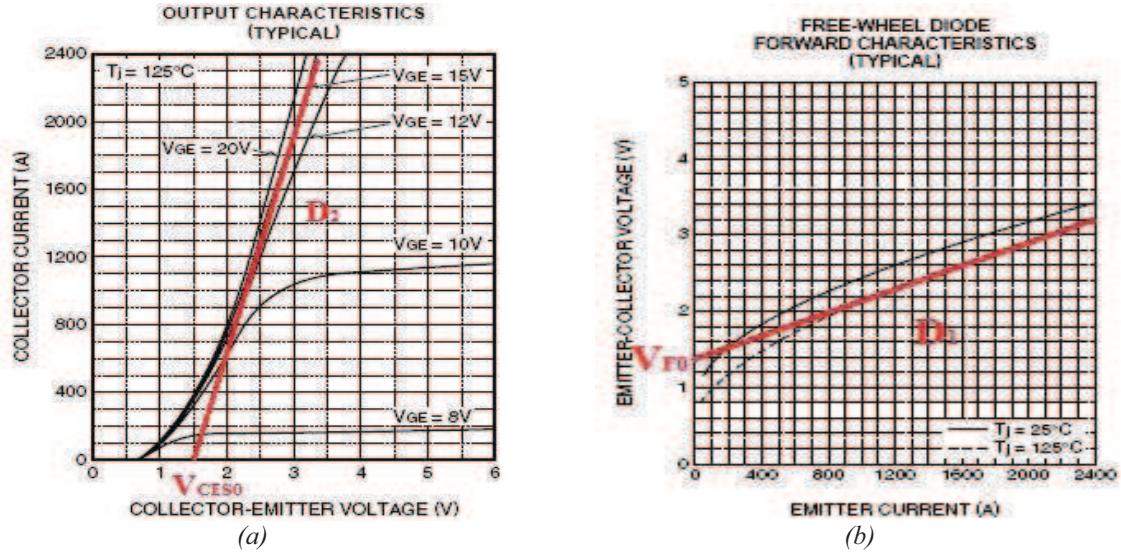
Pour calculer ces pertes à partir des fiches techniques fournies par le fabricant des IGBT, des approximations sont faites :

- La température des composants semi-conducteurs est supposé égale à sa valeur maximale, i.e. 125 °C pour le calcul de leurs résistances dynamiques.
- L'ondulation de la tension dans le bus continu est négligeable (< 2% de la tension V_{DC}) car elle est limitée par le filtre 2f. Ainsi, la tension $V_{DC}(t)$ aux bornes du bus continu est considérée constante en fonction du temps pour le cas du Tram Train.
- Les allures de la caractéristique de sortie d'un IGBT et de la caractéristique directe d'une diode à 125°C sont réduites à une approximation linéaire pour le calcul des pertes comme il est montré dans la figure IV.18. Ainsi, les expressions de la tension émetteur-collecteur V_{CES} d'un IGBT et la tension aux bornes d'une diode V_F, à l'état passant, s'écrivent :

$$V_{CES}(t) = V_{CES0}^{125°C} + r_{CES}^{125°C}.i_s(t) \tag{IV.76}$$

$$V_F(t) = V_{F0}^{125°C} + r_F^{125°C}.i_s(t) \tag{IV.77}$$

où $V_{CES0}^{125°C}, V_{F0}^{125°C}, r_{CES}^{125°C}$ *et* $r_F^{125°C}$ sont respectivement les chutes de tension de l'IGBT et de la diode lorsqu'ils sont parcourus par un courant très faible (cf. Figure IV.22) et les résistances dynamiques de l'IGBT et de la diode qui représentent les pentes des droites D_1 *et* D_2 montrées dans la Figure IV.22 (a)-(b). $i_s(t)$ est le courant commuté.



(a) *(b)*

Figure IV.22 : Caractéristiques courant tension d'un IGBT (a) et d'une diode de puissance (b)

Pertes en conduction dans un IGBT

La puissance instantanée dissipée dans l'IGBT T_1 à l'état passant est $V_{CES}(t).i_s(t)$.Ainsi, sur une alternance positive de la tension d'entrée, les pertes par conduction dans un IGBT sont exprimées par :

$$P_{IGBT}^{Cond}(t) = f_{11}(t).V_{CES}(t).i_s(t) = f_{11}(t).(V_{CES0}^{125°C}(t).i_s(t) + r_{CES}^{125°C}.i_s^2(t)) \quad \text{(IV.78)}$$

Sur une période de modulation T_p de la MLI, la puissance active dissipée dans l'IGBT est donnée par (IV.79), dans le cas où F_p<<f [DEL-10a].

$$\begin{aligned}\langle P_{IGBT}^{Cond}(t)\rangle_{T_p} &= \langle f_{11}(t)\rangle_{T_p}.(V_{CES0}^{125°C}(t).i_s(t) + r_{CES}^{125°C}.i_s^2(t)) \\ &= 0.5(1 + rsin(\omega t))(V_{CES0}^{125°C}(t).i_s(t) + r_{CES}^{125°C}.i_s^2(t))\end{aligned} \quad \text{(IV.79)}$$

La puissance active perdue en conduction par un IGBT est obtenue par la valeur moyenne de $\langle P_{IGBT}^{Cond}(t)\rangle_{T_p}$ sur une période électrique T :

$$\begin{aligned}P_{IGBT}^{Cond} &= \frac{1}{T}\int_0^T \langle P_{IGBT}^{Cond}(t)\rangle_{T_p}\,dt \\ &= \sqrt{2}V_{CES0}^{125°C}\left(\frac{1}{2\pi} + \frac{r.cos\varphi_s}{8}\right).I_s + r_{CES}^{125°C}\left(\frac{1}{4} + \frac{2.r.cos\varphi_s}{3\pi}\right).I_s^2\end{aligned} \quad \text{(IV.80)}$$

Pertes en conduction dans une diode

Par une démarche identique à celle menée pour l'IGBT et en tenant en compte de la complémentarité des intervalles de conduction de T1 et D2 durant l'alternance positive de la tension, on obtient :

$$P_{diode}^{Cond}(t) = (1 - f_{11}(t)).V_F(t).i_s(t) = (1 - f_{11}(t).(V_{F0}^{125°C}(t).i_s(t) + r_F^{125°C}.i_s^2(t)) \quad \text{(IV.81)}$$

Sur une période de MLI, la valeur moyenne de ces pertes est donnée par :

$$\begin{aligned}\langle P_{diode}^{Cond}(t)\rangle_{T_p} &= (1 - \langle f_{11}(t)\rangle_{T_p}).(V_{F0}^{125°C}(t).i_s(t) + r_F^{125°C}.i_s^2(t)) \\ &= 0.5(1 - rsin(\omega t))(V_{F0}^{125°C}(t).i_s(t) + r_F^{125°C}.i_s^2(t))\end{aligned} \quad \text{(IV.82)}$$

Par intégration de $\langle P_{diode}^{Cond}(t)\rangle_{T_p}$ sur une période T, on obtient la puissance perdue en conduction par une diode comme suit :

$$\begin{aligned}P_{diode}^{Cond} &= \frac{1}{T}\int_0^T \langle P_{diode}^{Cond}(t)\rangle_{T_p}\,dt \\ &= \sqrt{2}V_{F0}^{125°C}\left(\frac{1}{2\pi} - \frac{r.cos\varphi_s}{8}\right).I_s + r_F^{125°C}\left(\frac{1}{4} - \frac{2.r.cos\varphi_s}{3\pi}\right).I_s^2\end{aligned} \quad \text{(IV.83)}$$

Pertes par commutation

Les pertes par commutation proviennent du comportement transitoire des composants lors des changements d'état. L'énergie dissipée dépend de la valeur du courant commuté, de la tension à l'état bloqué (tension du bus continu), de la température de jonction des composants, de la fréquence de commutation et des caractéristiques de l'étage « driver » des transistors [FUJ-04].

L'énergie totale perdue est la somme de l'énergie perdue pour une fermeture (E_{on}), une ouverture (E_{off}) de l'IGBT ainsi que l'énergie perdue en raison du courant de recouvrement de la diode lors de son blocage (E_{rr}). L'approche la plus simple proposée dans la littérature consiste à considérer que ces différentes énergies évoluent linéairement en fonction du courant commuté et de la tension du bus continu sous la forme [SAR-08]:

$$\begin{aligned} E_{on}(I_c, V_{DC}, T_j) &= k_{on}(T_j) I_s V_{DC} \\ E_{off}(I_c, V_{DC}, T_j) &= k_{off}(T_j) I_s V_{DC} \\ E_{rr}(I_c, V_{DC}, T_j) &= k_{rr}(T_j) I_s V_{DC} \end{aligned} \quad \text{(IV.84)}$$

avec $k_{on} = td_{on} + tr$, $k_{off} = td_{off} + tf$ et $k_{rr} = t_{rr}$ où td_{on} est le temps de réponse à l'ouverture (turn-on delay time), tr est le temps nécessaire pour l'établissement de courant (turn-on rise time), td_{off} est le temps de réponse à la fermeture (turn-off delay time), tf est le temps nécessaire pour l'annulation de courant (turn-off fall time) et t_{rr} est le temps nécessaire pour recouvrement (reverse recovery time).

Pertes par commutation dans un IGBT

En tenant en compte les hypothèses faites, l'énergie perdue à chaque fermeture de l'IGBT T_1 s'écrit :

$$E_{on}(t) = k_{on}^{125°C} V_{DC}(t) i_s(t) \quad \text{(IV.85)}$$

L'interrupteur étant dans sa zone de fonctionnement linéaire (0 < r < 1), l'énergie moyenne perdue à chaque fermeture de l'interrupteur durant une alternance positive de la tension correspond à la moyenne de $E_{on}(t)$ sur cette demi-période.

$$E_{on}^{moy} = \frac{2k_{on}^{125°C} V_{DC}(t)}{T} \int_{\frac{\varphi}{\omega}}^{\frac{T}{2}+\frac{\varphi}{\omega}} I_s \sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi)\, dt = \frac{2\sqrt{2} k_{on}^{125°C} V_{DC} I_s}{\pi} \quad \text{(IV.86)}$$

Or T1 commute $F_p/2$ fois par seconde (uniquement pendant l'alternance positive de la tension) par période pour une fréquence de commutation F_p, ce qui donne la puissance active correspondante aux pertes à la fermeture de l'interrupteur :

$$P_{on} = \frac{F_p \sqrt{2} k_{on}^{125°C} V_{DC} I_s}{\pi} \quad \text{(IV.87)}$$

Le calcul des pertes à l'ouverture suit une démarche identique et on obtient pour un transistor :

$$P_{off} = \frac{F_p \sqrt{2} k_{off}^{125°C} V_{DC} I_s}{\pi} \tag{IV.88}$$

Les pertes par commutation dans un IGBT s'écrivent :

$$P_{IGBT}^{Comm} = P_{on} + P_{off} = \frac{F_p V_{DC} \sqrt{2} I_s}{\pi} (td(on) + tr + td(off) + tf) \tag{IV.89}$$

Pertes liées au recouvrement d'une diode

En suivant la même démarche utilisée pour calculer P_{on} d'un IGBT, l'expression des pertes dans une diode en lien avec le phénomène de recouvrement est :

$$P_{diode}^{Comm} = \frac{F_p V_{DC} trr \sqrt{2} I_s}{\pi} \tag{IV.90}$$

Pertes totales dans le PMCF

Le calcul des pertes dans le PMCF est obtenu par :

$$P_{PMCF} = n_{IGBT}(P_{IGBT}^{Comm} + P_{diode}^{Comm} + P_{diode}^{Cond} + P_{IGBT}^{Cond}) \tag{IV.91}$$

n_{IGBT} est le nombre d'IGBT par PMCF et vaut ici 8.

Modèle thermique du PMCF

Le modèle thermique élaboré pour le PMCF est un modèle linéaire obtenu par une analogie entre les lois thermiques et électriques comme montré en Figure IV.23. Dans ce modèle on considère que les échanges thermiques se font uniquement par conduction et que les flux thermiques (les pertes) sont unidirectionnels (de la jonction vers la semelle du boitier). Ce modèle est un modèle thermique en 1D qui aboutit à des résultats satisfaisants pour le calcul des températures de jonction [FER-99]. Avec ce modèle, on peut déterminer les différentes températures pour chaque point de fonctionnement du Tram Train. Ce schéma thermique n'est valable que pour une étude thermique statique car les capacités thermiques ne sont pas représentées.

Dans cette figure P_{IGBT} et P_{diode} désignent les pertes dans les IGBT et dans la diode. Ces pertes sont données par :

$$P_{IGBT} = P_{IGBT}^{Comm} + P_{IGBT}^{Cond} \tag{IV.92}$$

$$P_{diode} = P_{diode}^{Comm} + P_{diode}^{Cond} \tag{IV.93}$$

R_{th_rad}, R_{th_case}, $R_{th_jundiode}$ et $R_{th_junIGBT}$ représentent respectivement les résistances thermiques du radiateur, du boitier et de la jonction d'une diode et d'un IGBT. T_{amb} désigne la température ambiante dans un coffre de traction.

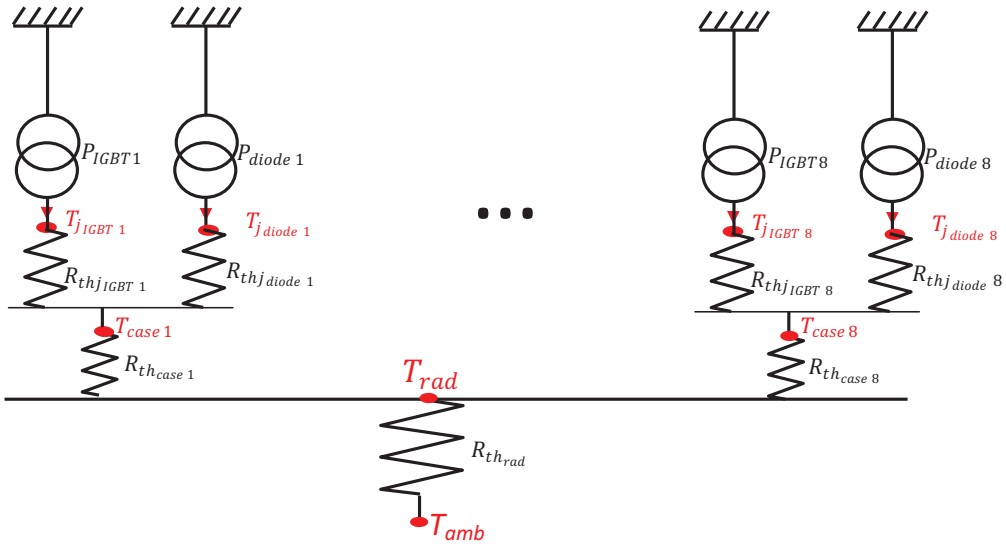


Figure IV.23 : Modèle thermique statique d'un PMCF

IV.4.3. Interaction entre transformateur et PMCF

Calcul des harmoniques de courant

Pour mettre en évidence l'influence de la fréquence de commutation sur les grandeurs du transformateur, il faut commencer par quantifier les harmoniques de courant.

Les signaux de commande des IGBT sont élaborés à partir de la comparaison des modulantes et de la porteuse, ainsi la modification de la fréquence de commutation a une répercussion sur le contenu harmonique de la tension V_{PMCF} et du courant secondaire I_s .

Un modèle électrique de l'ensemble transformateur de traction et PMCF a été élaboré sur le logiciel PSIM®, comme montré en Figure IV.24. Ce modèle nous permet de vérifier les allures de la tension et du courant au secondaire du transformateur (cf. Figure IV.25) et de valider le calcul des harmoniques.

Dans le modèle présenté en Figure IV.24, les modulantes sont comparés à la porteuse. Les signaux résultants de cette comparaison représentent les commandes d'un IGBT. Les signaux de commande alimentent la gâchette du semi-conducteur à travers un « driver » (représenté par un triangle sur PSIM®) qui amplifie la puissance des signaux de commande.

Sur un seul bras, nous avons mentionné que les commandes doivent être complémentaires, pour ce fait des portes logiques « non » (NOT) sont utilisées sur chaque demi-bras du PMCF. Le bus continu a été modélisé par une source de tension continue qui délivre une tension égale à celle du bus dans le cas du Tram Train. En effet, en réalité un étage onduleur et une machine synchrone à aimant sont installés derrières le PMCF et dans notre modélisation nous nous n'intéressons pas à ces deux composants mais nous savons que

le rôle du PMCF est de maintenir la tension dans le bus continu constante, ce qui justifie l'installation de cette source de tension.

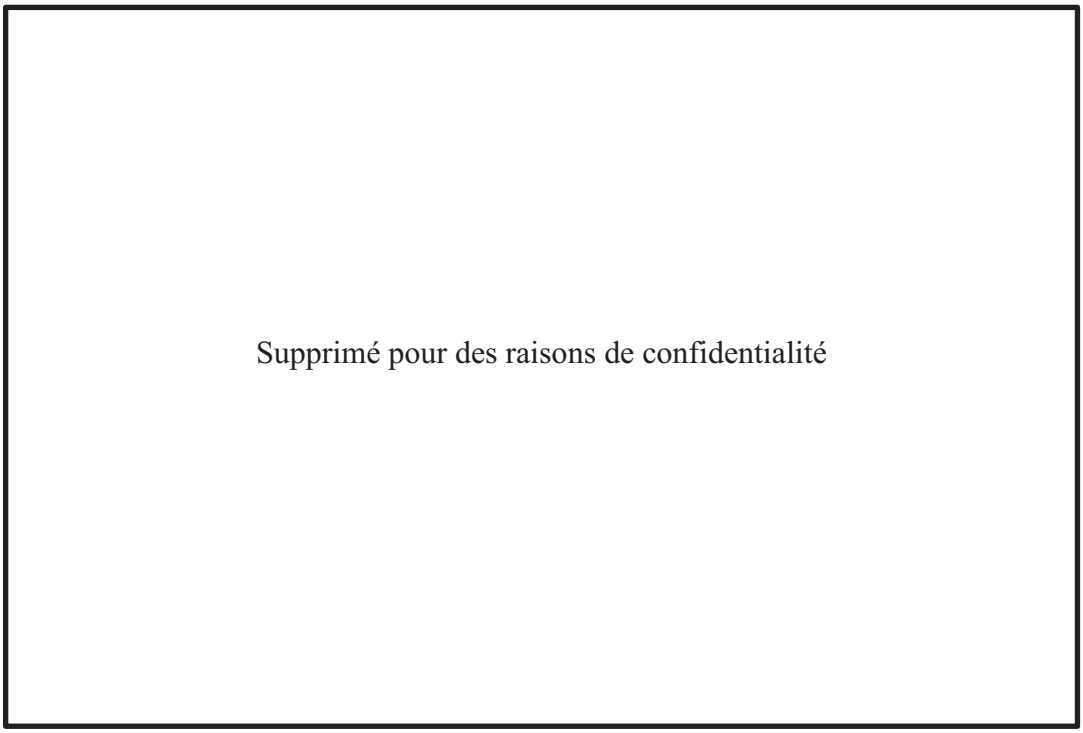


Figure IV.24 : Modélisation du PMCF et d'un secondaire de transformateur sur PSIM®

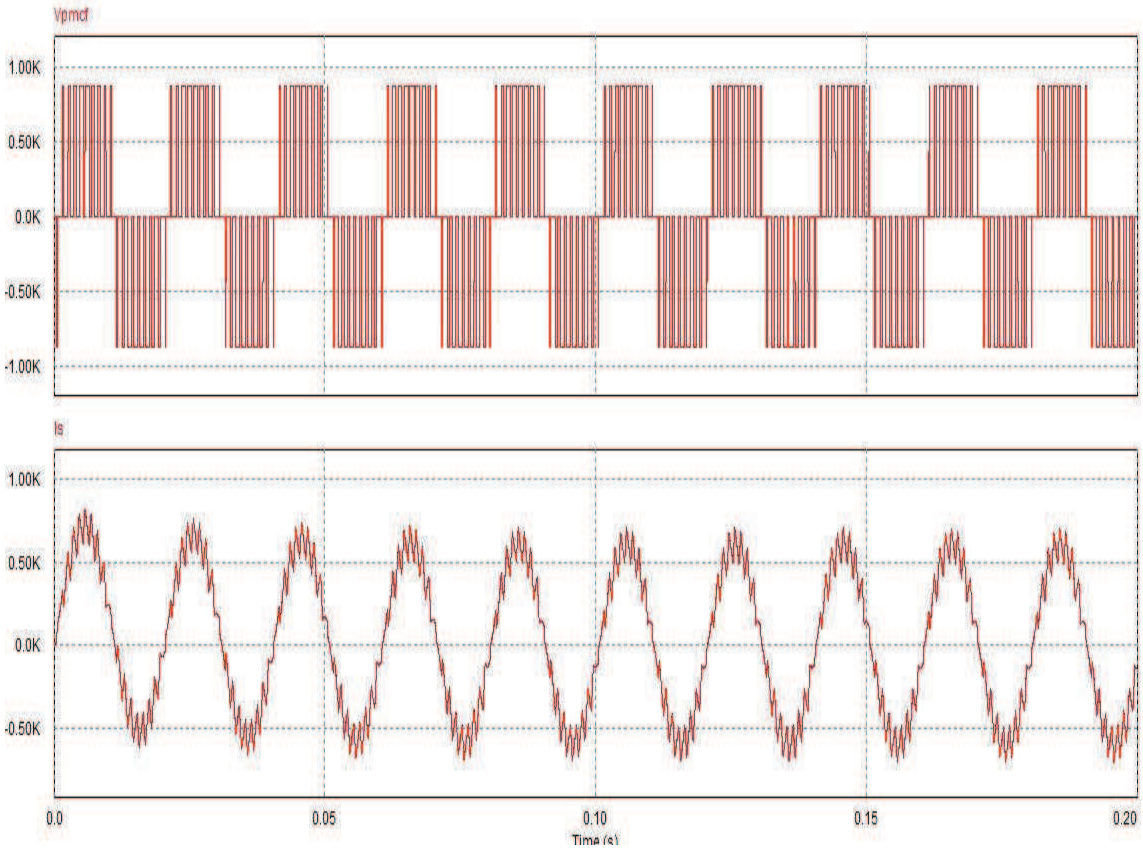
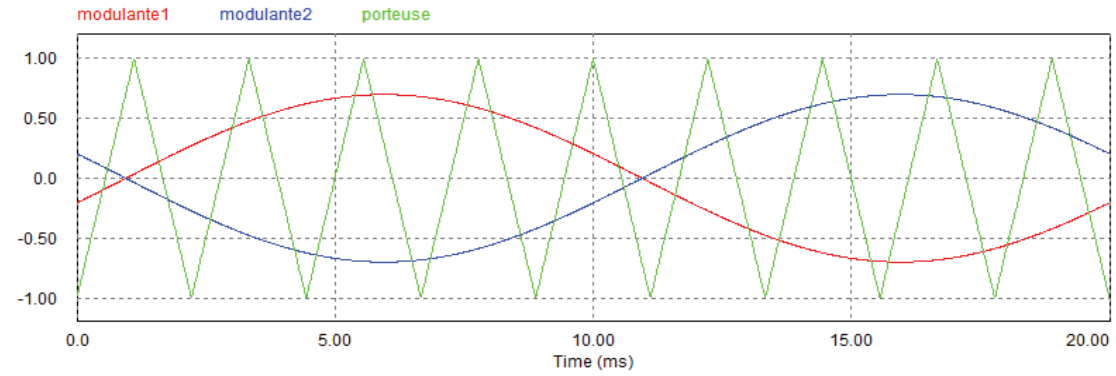
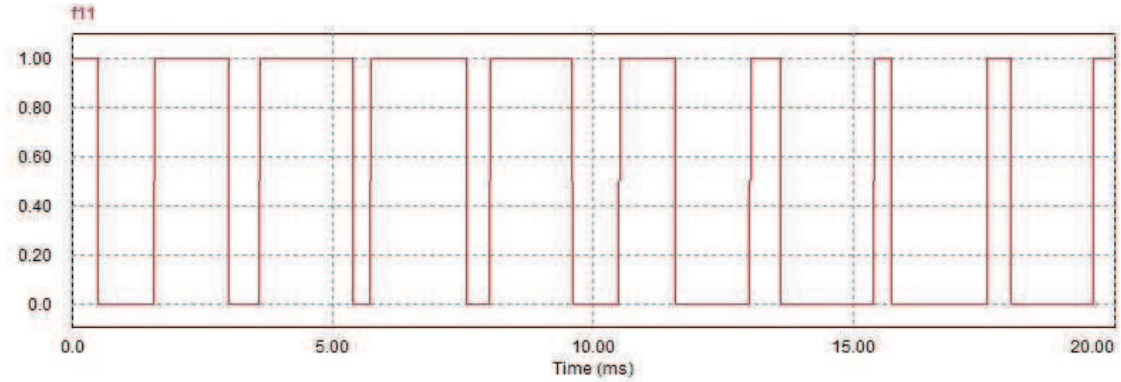


Figure IV.25 : Allure de la tension et du courant au secondaire du transformateur

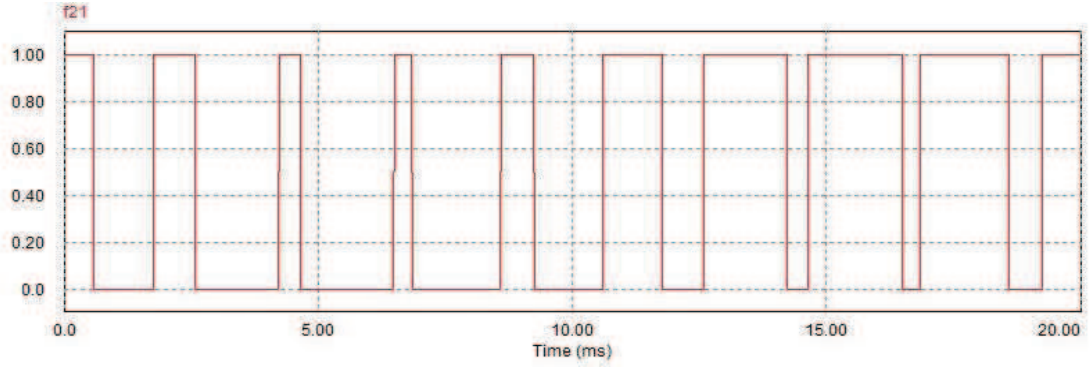
Les Figure IV.26 (a-d) montrent l'élaboration de la tension secondaire à partir des signaux de commande des IGBT sur PSIM®.



(a)



(b)



(c)

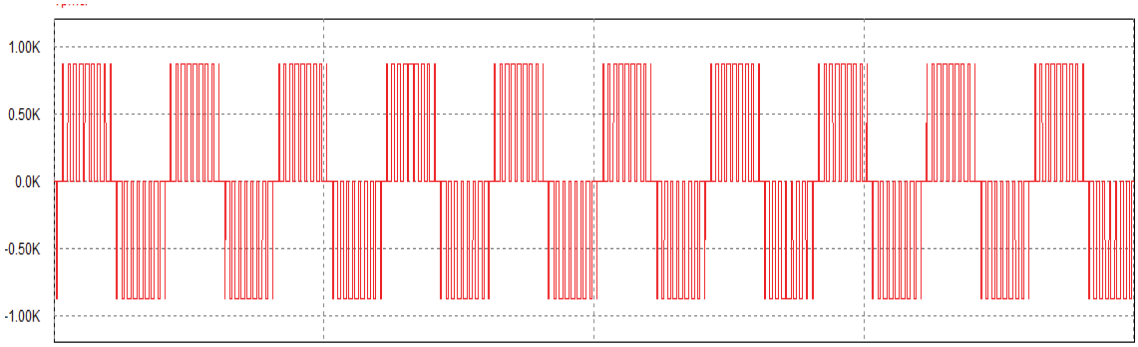


Figure IV.26 : Les signaux de commande implantés sur PSIM® et la tension obtenue aux bornes du PMCF

Le calcul des harmoniques de tension renvoyés sur le secondaire du TT est fait par PSIM® et ensuite il est comparé avec les résultats du modèle construit. La comparaison des spectres harmoniques de tension est montrée en Figure IV.27 et Figure IV.28.

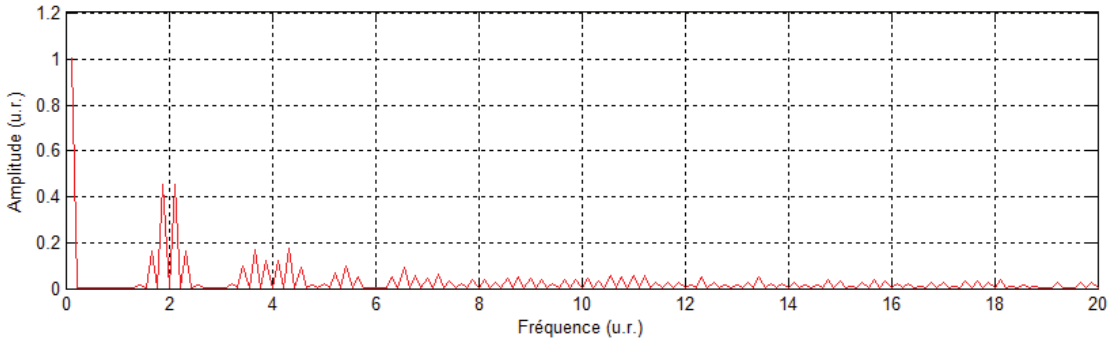


Figure IV.27 : Harmoniques de tension renvoyés sur le transformateur calculés par PSIM®

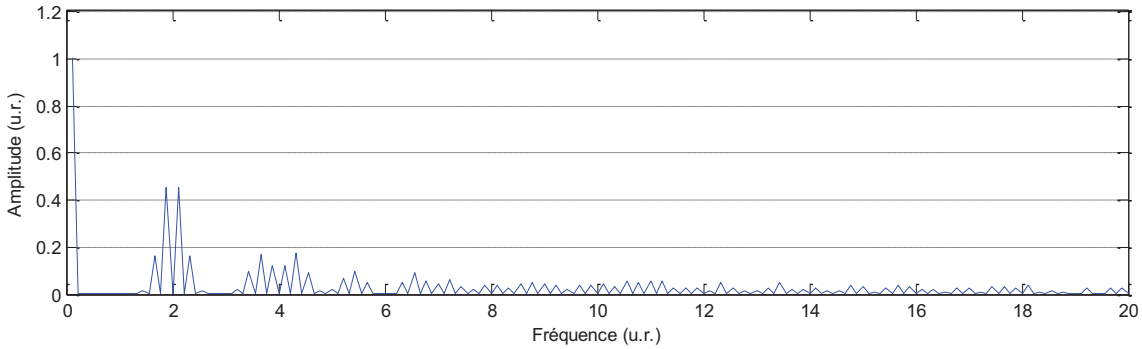


Figure IV.28 : Harmoniques de tension renvoyés sur le transformateur calculés par le modèle

Les résultats présentés dans les figures précédentes montrent que le modèle calcule précisément les harmoniques de la tension à l'entrée du PMCF. Ils serviront dans le calcul des harmoniques de courant et des pertes dans le transformateur.

Pour le calcul des harmoniques de courant dans le transformateur, nous avons exploité les schémas électriques équivalents d'un secondaire de transformateur pour le fondamental et les autres harmoniques. Ces schémas sont donnés dans les Figure IV.29 (a)-(b).

(a) (b)

Figure IV.29 : Schéma équivalent d'un secondaire du transformateur pour le fondamental (a) et les harmoniques (b)

En se basant sur la Figure IV.29 (b), l'harmonique h du courant I_h est facilement déduite par :

$$I_h = \frac{V_h}{\sqrt{{R_s}^2 + (2\pi L_f f_h)^2}} \tag{IV.94}$$

avec

$$R_s = F_R(f_h) R_{dc} \tag{IV.95}$$

$$L_f = F_L(f_h) L_f \tag{IV.96}$$

Pour valider la formule (IV.94), les spectres harmoniques du courant obtenus par la décomposition en série de Fourrier du courant I_s (montré dans la Figure IV.25) avec PSIM® et celui obtenu par notre modèle sont comparés dans les Figure IV.30 et Figure IV.31 pour une fréquence de commutation $F_p = F_{p0}$(fréquence de commutation actuelle.

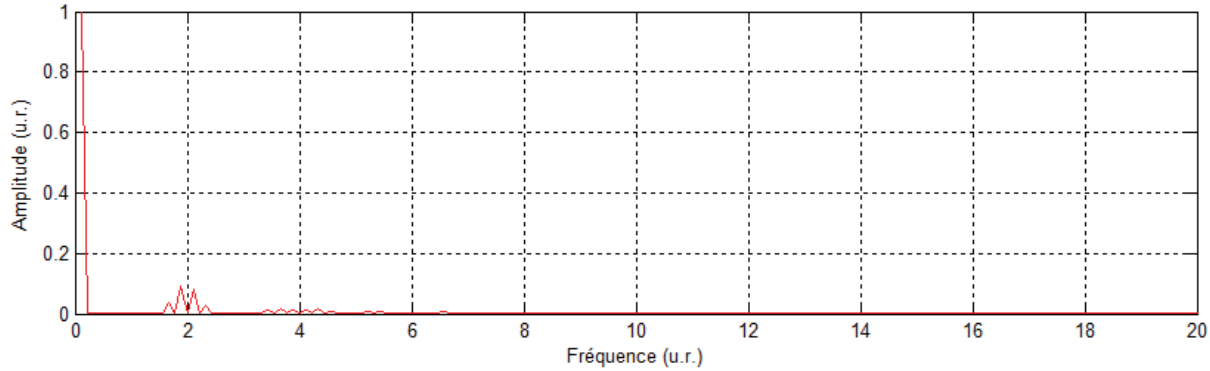


Figure IV.30 : Spectre harmonique (PSIM®) du courant dans un secondaire du transformateur pour la fréquence de commutation $\boldsymbol{F_{p0}}$ *dans le PMCF.*

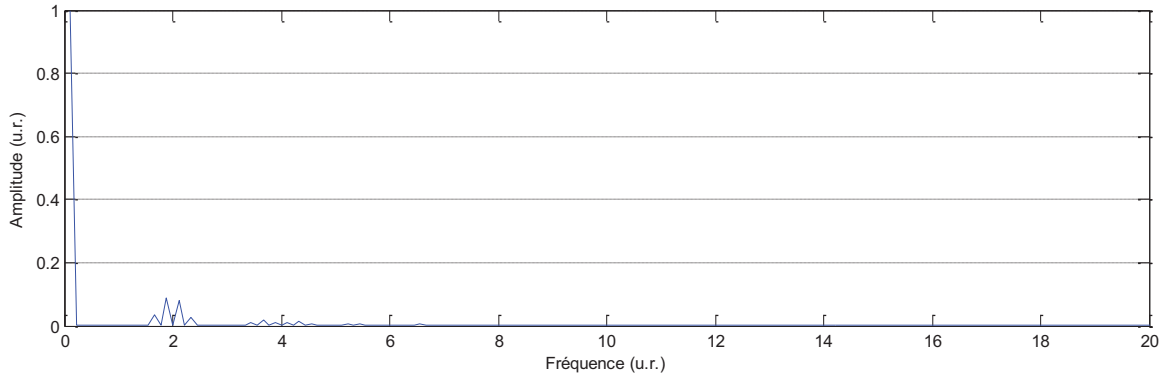


Figure IV.31 : Spectre harmonique (modèle) du courant dans un secondaire du transformateur la fréquence de commutation $\boldsymbol{F_{p0}}$ *dans le PMCF.*

Ces deux figures montrent deux spectres harmoniques de courant secondaire identiques, ce qui valide la formule (IV.94) utilisée dans notre modèle.

L'étude menée dans cette section a montré que le modèle élaboré pour le calcul des harmoniques renvoyées sur le secondaire du transformateur est fiable et reproduit exactement

les spectres harmoniques de tension et de courant trouvés par le logiciel PSIM® pour une fréquence de commutation donnée. Dans la suite, on étudie l'influence de la fréquence de commutation du PMCF sur les pertes du transformateur.

Influence de la fréquence de découpage sur les pertes du transformateur

Pour voir l'évolution des pertes dans le transformateur en fonction de la fréquence de commutation des IGBT, le modèle complet du TT et PMCF, montré dans la Figure IV.32, a été construit.

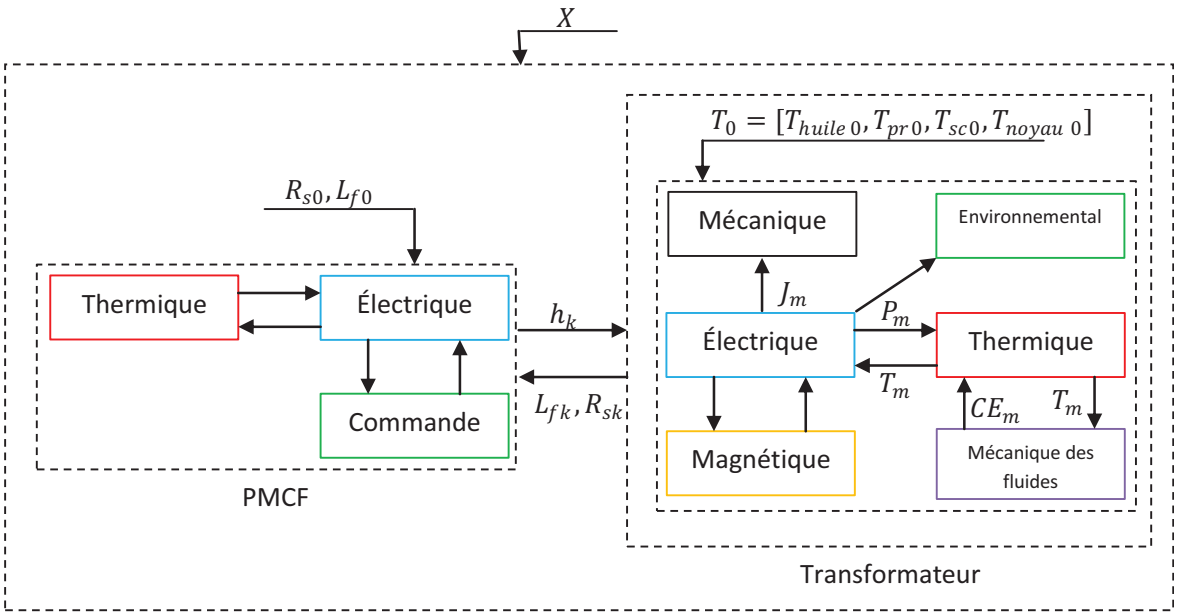


Figure IV.32 : Modèle complet du transformateur + PMCF

où R_{s0} et L_{f0} sont les valeurs initiales (k=0) de la résistance et de l'inductance de fuite du transformateur ramenées au secondaire et h_k est le spectre harmonique de la tension à l'itération k.

Les interdépendances entre PMCF et TT montrées dans cette figure proviennent d'une part, du fait que le modèle du PMCF a besoin des valeurs de l'inductance de fuite L_f et de la résistance R_s d'un secondaire pour estimer l'amplitude et la phase de V_{PMCF} qui permettra d'avoir un courant secondaire en phase avec le fondamental du courant secondaire. D'autre part, le modèle du transformateur doit récupérer les harmoniques de courant renvoyés par le PMCF sur le secondaire pour le calcul des pertes fer et cuivre.

Pour gérer ces interdépendances nous avons choisi la formulation multidisciplinaire MDF+PF. Cette formulation assure la consistance des valeurs de la résistance et de l'inductance de fuite vis-à-vis du spectre harmonique h_k à chaque itération k de la méthode du point fixe. Les itérations s'arrêtent lorsque le critère d'arrêt ci-dessous est satisfait.

$$\left|L_{fk} - L_{f(k-1)}\right| + \left|R_{sk} - R_{s(k-1)}\right| \leq \varepsilon_1 \qquad \text{(IV.97)}$$

La formulation MDF est utilisée ici pour gérer les indépendances entre deux modèles de deux composants différents. Il s'agit d'une formulation MDF multi-niveaux.

Pour différentes fréquences de commutation F_p des IGBT, le modèle complet présenté dans la Figure IV.32 est utilisé pour calculer les pertes PMCF et les pertes dans le transformateur. Leurs évolutions en fonction de la fréquence de commutation sont montrées en Figure IV.33.

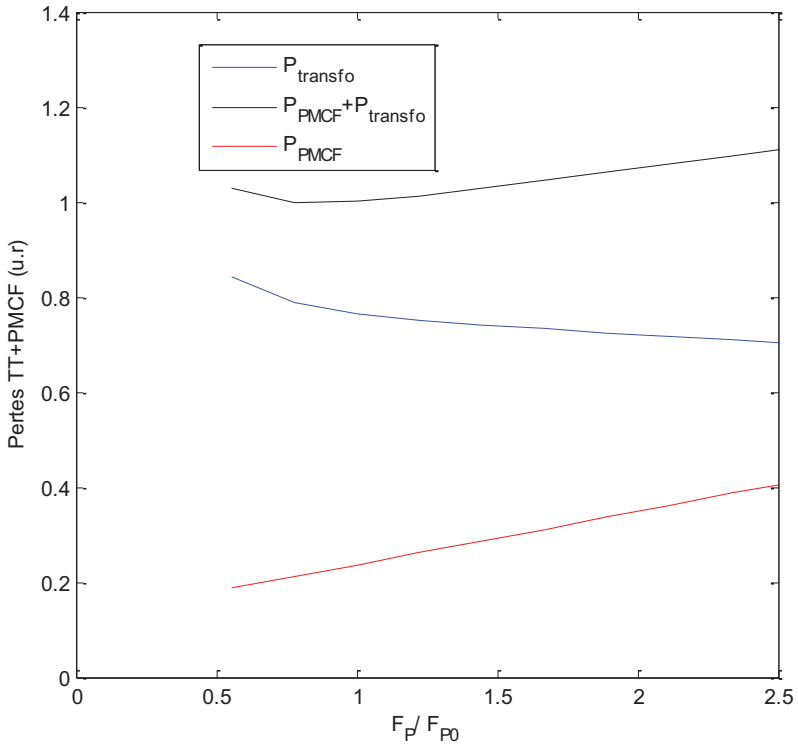


Figure IV.33 : Evolution des pertes dans le transformateur de traction et dans les PMCF en fonction de la fréquence de commutation dans le PMCF

La Figure IV.33 montre que la fréquence de commutation qui engendre le minimum de pertes pour l'ensemble TT et PMCF actuels est comprise entre 0.78 F_{p0} et F_{p0} (fréquence de commutation actuelle) et que les pertes dans le PMCF augmentent d'une façon linéaire avec la fréquence de commutation F_p, ce qui est facile à vérifier en regardant les formules (IV.89) et (IV.90). Quant au cas du transformateur, les pertes ont une tendance asymptotique vers les pertes fondamentales lorsque la fréquence de commutation augmente.

En regardant la formule de Steinmetz (IV.32), on voit que les pertes fer harmoniques dans le transformateur augmentent lorsque la fréquence des harmoniques augmente. Donc, il est judicieux d'étudier l'évolution des pertes Joule pour expliquer la diminution des pertes totales dans le transformateur.

Pour chaque harmonique h autre que le fondamental, on reprend les formules (IV.34) et (IV.35) en remplaçant δ par δ_h pour calculer l'épaisseur de peau propre à chaque harmonique :

$$\delta_h = \sqrt{\frac{\rho_{cond}^{25\,°C}(1+\alpha_{cond}T_{cond})}{\pi\mu_0 f_h}} \tag{IV.98}$$

Le rapport de l'épaisseur radiale des conducteurs sur l'épaisseur de peau de l'harmonique h vaut:

$$\varphi_h = \frac{d}{\delta_h} \tag{IV.99}$$

Sachant que le coefficient F_R vaut 1 pour la fréquence du fondamental. Les pertes cuivre dans le transformateur exprimées en (IV.40) s'écrivent alors :

$$P_{copper} = R_{dc}.I_s^2 + \sum_{h=2}^{\infty} F_R(f_h)\, R_{dc} I_h^2 \tag{IV.100}$$

Dans la formule (IV.100), il y a deux paramètres qui dépendent de la fréquence et qui sont les amplitudes des harmoniques de courant et le coefficient F_R.

Pour voir l'influence de la fréquence de commutation sur les harmoniques de courant nous partons des spectres harmoniques de la tension secondaire du transformateur pour deux fréquences de commutation $F_p = F_{p0}$ et $F_p = F_{p-max}$. Les deux spectres harmoniques sont montrés sur les Figure IV.28 et Figure IV.34.

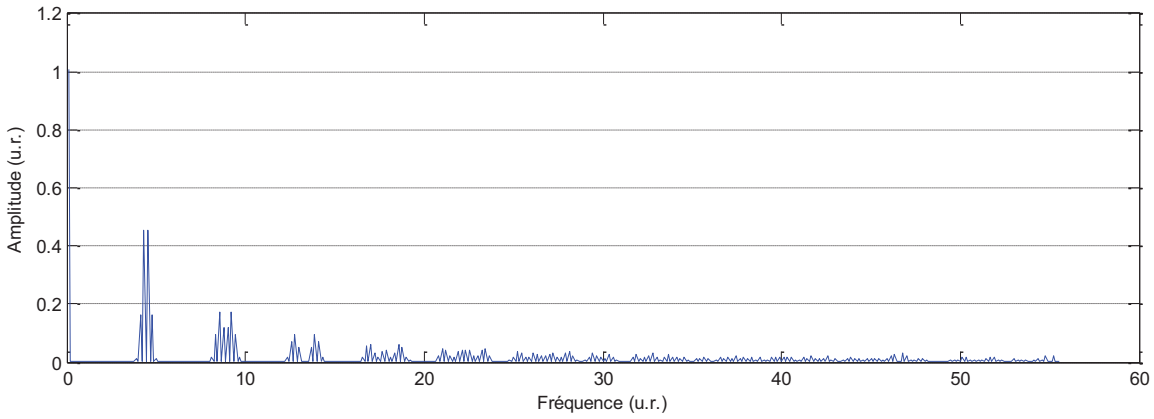


Figure IV.34 : Spectre harmonique de la tension dans un secondaire du transformateur pour une fréquence de commutation F_{p-max} dans le PMCF

La comparaison des spectres de tension donnés dans les Figure IV.28 et Figure IV.34 montre que l'augmentation de la fréquence de commutation F_p n'a pas d'influence sur les amplitudes des harmoniques de tension mais par contre elle fait décaler les fréquences de ses harmoniques vers des ordres pairs de la fréquence de commutation. Pour ces deux fréquences (F_{p0}et F_{p-max}) les rapports entre les termes R_s et $2\pi f_h L_f$ pour le premier harmonique (rapport minimal) sont respectivement de 140 et de 311. Donc, on peut négliger le terme R_s devant $2\pi f_h L_f$ pour tous les harmoniques autre que le fondamental. Il en résulte que (IV.94) peut être simplifiée par :

$$I_h = \frac{V_h}{2\pi L_f f_h} \approx f^{\Theta}\left(\frac{C_1 V_h}{f_h}\right) \quad \text{(IV.101)}$$

où C_1 est une constante et V_h est constante pour tout les harmoniques ayant le même rang quel que soit la fréquence de commutation. Ainsi, le rapport $\frac{V_h}{f_h}$ tend vers 0 lorsque f_h tend vers l'infini.

La formule (IV.101) montre que l'amplitude des harmoniques du courant diminue hyperboliquement en fonction de leurs fréquences. Pour conforter cette explication le spectre harmonique du courant pour la fréquence de commutation $F_p = F_{p-max}$ (cf. Figure IV.35) est comparé à celui pour $F_p = F_{p0}$ montré en Figure IV.31.

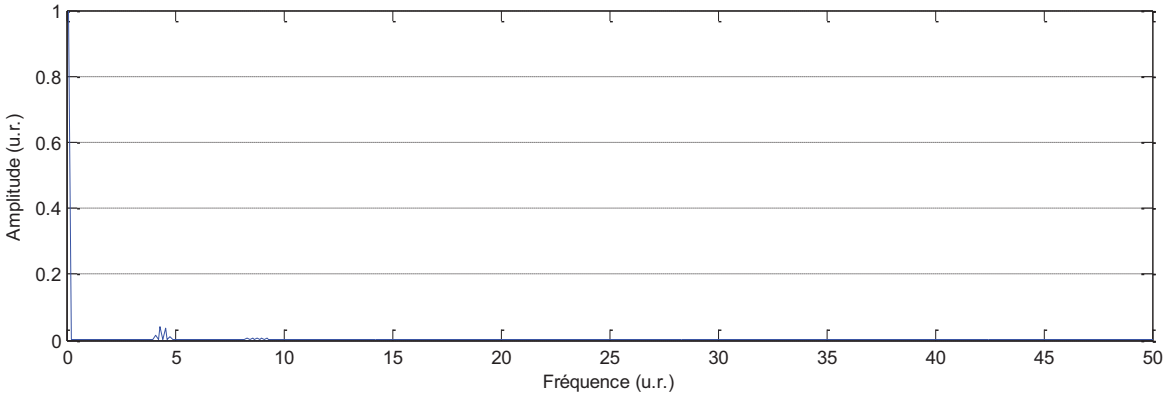


Figure IV.35 : Spectre harmonique du courant dans un secondaire du transformateur pour une fréquence de commutation de $F_{p\text{-}max}$ dans le PMCF

D'après les Figure IV.31 et Figure IV.35, nous constatons que les amplitudes des harmoniques du courant (autre que le fondamental) ont été atténuées d'un rapport 2.2 pour la fréquence F_{p-max} par rapport à celles obtenues pour la fréquence de F_{p0}. Le rapport d'atténuation correspond au rapport des deux fréquences de commutation, qui est aussi le rapport des fréquences des harmoniques de même rang, ce qui est cohérent avec la formule simplifiée (IV.101).

Voyons maintenant l'évolution du coefficient F_R en fonction des fréquences des harmoniques. Pour ceci, nous avons balayé une plage de fréquence allons de 250 Hz à 7 kHz et avons relevé les valeurs de F_R. Nous avons obtenu la Figure IV.36.

La Figure IV.36 montre que l'approximation de F_R par une fonction proportionnelle à la racine carrée de la fréquence donne les bonnes tendances. Ainsi, F_R est approché par :

$$F_R \approx C_2 (f_h)^{\frac{1}{2}} \quad \text{(IV.102)}$$

où C_2 est une constante.

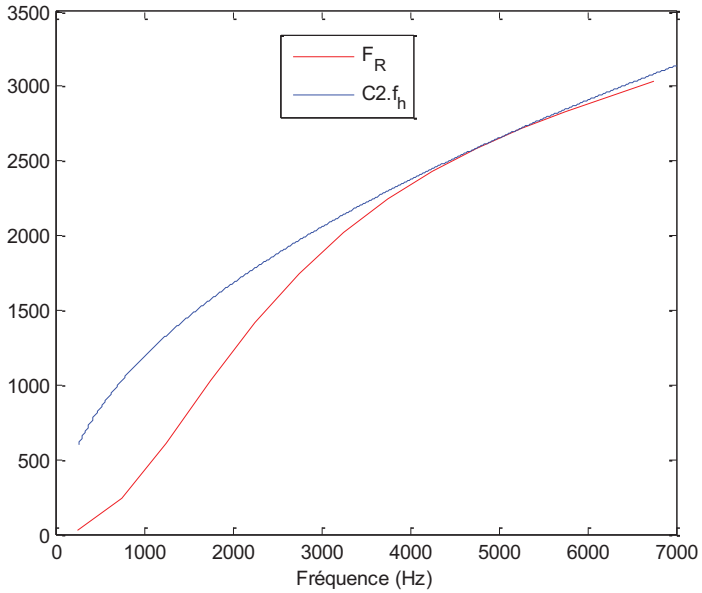


Figure IV.36 : Evolution du coefficient $\boldsymbol{F_R}$ en fonction de la fréquence des harmoniques

Revenons maintenant aux pertes Joule exprimées dans (IV.100) et qui, en tenant compte de (IV.101) et (IV.102) peuvent s'écrire de la manière suivante :

$$P_{copper} \cong R_{dc}{I_s}^2 + R_{dc}\sum_{h=2}^{n_h} C_{3h}\left(\frac{1}{f_h}\right)^{3/2} \qquad \text{(IV.104)}$$

Cette formule montre que les pertes Joule dans le transformateur ont une tendance asymptotique vers les pertes Joule fondamentales lorsque la fréquence de commutation augmente. Comme ces pertes sont dominantes dans le transformateur (98% des pertes totales), l'évolution des pertes totales suit la même tendance que les pertes Joule ce qui est en accord avec la courbe trouvée dans la Figure IV.36.

Aspect systémique

Le transformateur représente un filtre passe bas à l'entrée du PMCF. Son inductance de fuite est dimensionnée pour limiter les harmoniques et l'ondulation du courant qui sont des paramètres importants pour calculer la valeur maximale du courant commuté dans les IGBT. Ceci permet d'estimer leurs pertes et de les dimensionner.

La fréquence de commutation, quant à elle, possède une influence sur les amplitudes des harmoniques de courant et, par conséquent, sur les pertes dans le transformateur. Cette fréquence possède aussi une influence sur les pertes de commutation dans le PMCF et intervient ainsi dans le dimensionnement de ces deux dispositifs.

Le couple de paramètres (F_p, L_f) est indispensable pour dimensionner le transformateur de traction et le PMCF. Donc, il faut attribuer une grande importance à ces deux paramètres interdépendants et inséparables dans la modélisation du transformateur et du PMCF parce

qu'au cours de l'optimisation, si l'un de ces deux paramètres est modifié il faut que l'autre soit modifié d'une façon cohérente.

IV.5. Résultats des optimisations

IV.5.1. Réduction de masse du transformateur

Un des objectifs de l'optimisation est d'obtenir un transformateur plus léger mais qui possède les mêmes performances fonctionnelles et la même efficacité énergétique (rendement $\geq$ 0.95) que le transformateur actuel. Pour cette optimisation, la fréquence de commutation des IGBT est constante et égale à la valeur du dispositif existant. Ainsi, les pertes du PMCF sont inchangées et la contrainte sur l'ondulation de courant aboutit à maintenir inchangée l'inductance de fuite. Le résultat de l'optimisation est comparé au transformateur existant dans le Tableau IV.5.

L'optimisation avec l'objectif de réduire la masse montre que nous pouvons obtenir un transformateur de traction plus léger de 5.7%. Cette masse est atteinte en réduisant la section du circuit magnétique et par conséquent les diamètres des enroulements primaire et secondaire, les dimensions des conducteurs dans l'enroulement primaire, les épaisseurs des canaux et de l'écran électrostatique.

Tableau IV.5 : Comparaison du transformateur obtenu par optimisation mono-objectif avec le transformateur existant.

Grandeurs/paramètres	Optimisation mono
Longueur (u.r.)	1.14
Hauteur (u.r.)	0.88
Largeur (u.r.)	0.88
Rcm (u.r.)	0.87
N1 (u.r.)	1.31
L1 (u.r.)	0.96
E1 (u.r.)	0.68
L2 (u.r.)	0.95
E2 (u.r.)	1.88
e_canal1 (u.r.)	1.25
e_ecran (u.r.)	0.80

Mfer (u.r.)	0.83
Masse_aluminium (u.r.)	0.70
Masse_cuivre (u.r.)	1.19
Masse TT (u.r.)	**0.94**
Volume cuve (u.r.)	0.88
Lf (u.r.)	1
max(T_pr) (u.r.)	0.93
max(T_sc) (u.r.)	0.99
max(Cij)	0.5
Rendement_TFP	**1**
Bm (u.r.)	1
$T_{oil-sup}$ (u.r.)	1.06
Pfer (u.r.)	0.82
Pj_dc_pr (u.r.)	1.84
Pj_dc_sc (u.r.)	0.94
Pj_ac_pr (u.r.)	0.97
Pj_ac_sc (u.r.)	1.03
h_enr (u.r.)	1.27
D_vie_pr (u.r.)	1.5
D_vie_sc (u.r.)	1.14

La réduction de la section du noyau est compensée par l'augmentation du nombre de spires au primaire en accord avec le théorème de Boucherot (IV.32). Cette diminution de la section du circuit magnétique a réduit la masse des tôles magnétiques de 17% et a contribué, avec la réduction des épaisseurs des canaux et de l'écran, à minimiser le diamètre des enroulements primaire et secondaire et par conséquent la hauteur, la largeur, le volume et la masse de la cuve et celle de l'huile de refroidissement d'environ 17%.

La réduction de la masse des tôles a réduit les pertes dans le noyau de 18%.

La minimisation des sections des fils primaires a permis de réduire la masse des conducteurs primaires de 30% et les pertes dues aux harmoniques dans le primaire du transformateur. En effet, les harmoniques générées par le PMCF possèdent des fréquences élevées qui augmentent les pertes par effets de peau et de proximité dans les enroulements du transformateur. Comme les pertes harmoniques représentent 30% des pertes Joule totales dans le cas du Tram Train, elles influent considérablement sur les résultats de l'optimisation.

L'augmentation du nombre de spires au primaire augmente aussi le nombre de spires au secondaire et par conséquent les résistances électriques et les pertes Joule liées au fondamental dans enroulements primaire et secondaire. Dans l'enroulement secondaire, les pertes Joule liées au fondamental sont dominantes. Une idée est d'augmenter les sections des conducteurs pour compenser l'augmentation du nombre de spires et ainsi maintenir la résistance du bobinage. L'utilisation de conducteurs avec des sections plus importantes a augmenté la masse des enroulements secondaire de 19% mais elle a réduit les pertes dues au fondamental de 6% et elle a augmenté les pertes dues aux harmoniques dans l'enroulement secondaire, soit au global une augmentation des pertes secondaire de 3%.

Quant au primaire, même si la résistance des enroulements a été augmentée par le nombre de spires, l'optimiseur s'est permis de réduire davantage la section du fil primaire et, par conséquent, la résistance a augmenté ainsi que les pertes dans le primaire. En effet, nous avons vu que les pertes harmoniques étaient conséquentes dans cet enroulement et que pour réduire ces pertes, il faut réduire la section des conducteurs. Cette diminution des sections avec l'augmentation du nombre de spires dans le bobinage de l'enroulement primaire a augmenté sa résistance et ses pertes Joule liées au fondamental de 84%. En contrepartie, les pertes harmoniques sont réduites soit, au global, une réduction des pertes Joule totales au primaire d'environ 3%.

La hauteur des enroulements dans le transformateur optimisé est supérieure à celle du transformateur actuel. Ceci a permis d'augmenter les surfaces de contact avec l'huile et par conséquent d'améliorer le coefficient d'échange thermique. Cette amélioration du coefficient d'échange a réduit les températures dans les enroulements du primaire de 7% dans le primaire et de 1% dans le secondaire ce qui a contribué à la prolongation de la durée de vie du transformateur de 30 ans à 42 ans. L'augmentation de la durée de vie a une répercussion directe sur les aspects économique et écologique. En effet, sur 90 ans nous pourrons économiser le prix d'un transformateur et nous pourrons préserver les ressources minérales et énergies primaires nécessaires à la fabrication d'un transformateur.

L'optimisation du transformateur seul a abouti à un transformateur plus léger de 6% environ. Cette solution a été obtenue par la réduction de la masse des tôles, de la cuve et des enroulements primaires. Pour maintenir le rapport de transformation, la masse de cuivre au secondaire a augmenté et dans une moindre mesure ses pertes. Ces pertes ont été compensées par la réduction des pertes fer et des pertes dans le primaire. Le TT obtenu n'est économiquement avantageux car il consomme plus de cuivre que le transformateur existant et le gain en masse n'est pas significatif. Ainsi, il est intéressant de poursuivre les investigations par une optimisation multi-objectif de l'ensemble TT+PMCF.

IV.5.2. Optimisation rendement et masse de l'ensemble transformateur et PMCF

Le problème d'optimisation de l'ensemble PMCF et transformateur de traction est pleinement justifié car l'augmentation de la fréquence de commutation augmente les pertes dans les IGBT et diminue celles du transformateur comme montré en Figure IV.33.

La diminution des pertes dans le transformateur influe sur la température de l'huile et par conséquence sur d'autres grandeurs dépendantes telles que les températures des conducteurs, la viscosité de l'huile, et les pertes de charge dans les canaux.

Pour prendre en compte le PMCF dans l'optimisation, nous avons choisi d'agir sur la fréquence de commutation des IGBT. Le modèle construit pour calculer les harmoniques générés par le PMCF ne donne des résultats cohérents que pour des fréquences de commutation multiples de la fréquence du fondamental. Puisque l'algorithme d'optimisation utilisé ne traite que des variables continues, différentes optimisations sont lancées avec différentes fréquences de commutation. Le but est d'obtenir l'ensemble des compromis entre la masse du transformateur et le rendement de l'ensemble transformateur et PMCF, la masse du PMCF étant supposée inchangée. Les résultats de l'optimisation de l'ensemble transformateur et PMCF sont montrés dans la Figure IV.37 pour des fréquences de commutation multiples de celle du fondamental pour des rapports compris entre 8 et 20.

Les résultats de l'optimisation montrent que le transformateur actuel n'est pas une solution optimale pour la fréquence de commutation actuelle F_{p0} car le TT existant n'est pas sur le front de Pareto.

Par contre, la solution trouvée par réduction de la masse du transformateur est également optimale pour le problème d'optimisation bi-objectif pour la fréquence F_{p0}, ce qui est logique et se traduit par le fait que la solution trouvée par réduction de la masse du transformateur est située sur le front de Pareto pour cette fréquence. En effet, dans le cas du problème d'optimisation du transformateur seul, nous avons imposé dans les contraintes que le transformateur ait les mêmes performances que celles du transformateur actuel et en particulier le rendement. De même, le rendement du PMCF ne dépend ici que de la fréquence de commutation et n'a donc pas été modifié.

Pour l'optimisation avec le modèle analytique complet du TT+PMCF nous avons choisi la méthode « Sequential quadratic programming » (SQP). Cette méthode est précise, rapide et capable de gérer efficacement un nombre assez important de contraintes (des dixaines) comme le cas de notre problème. Cependant la méthode SQP est une méthode locale destinée à des problèmes mono-objectif et sensible au bruit numérique. Pour remédier à ces défauts, l'utilisation d'un modèle analytique améliore la robustesse de cette méthode d'optimisation. En plus la combinaison de SQP avec la transformation epsilon-contraintes permet de résoudre le problème multi-objectif et aussi une meilleure répartition des solutions sur les fronts de Pareto. Finalement, la résolution du problème d'optimisation avec plusieurs points initiaux tirés au hasard pour chaque point du front limite le risque de tomber sur des optimums locaux.

La Figure IV.37 montre qu'on peut obtenir des solutions optimales plus intéressantes en augmentant la fréquence de commutation dans les IGBT jusqu'à F_{p1}. Au-delà de cette fréquence, les solutions commencent à se dégrader en masse et en rendement. Pour expliquer cette évolution, nous allons comparer, dans le Tableau IV.6, les solutions optimales trouvées pour des fréquences de commutation F_{p0}, F_{p1}, F_{p2} et F_{pmax} et qui présentent des rendements de l'ensemble TT et PMCF proches de la solution existante.

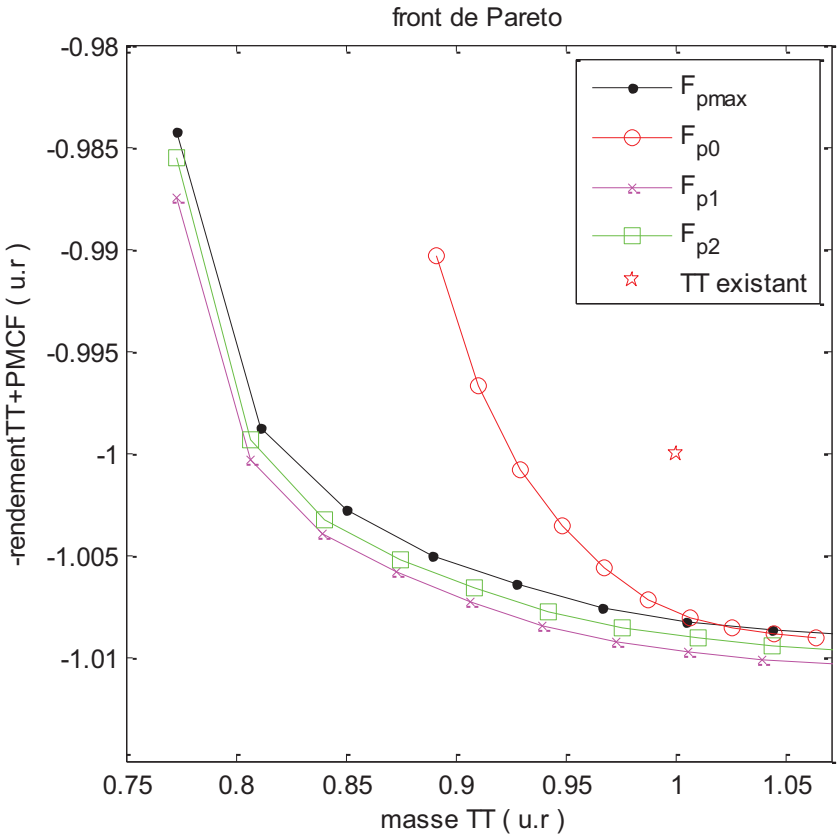


Figure IV.37 : Résultats de l'optimisation bi-objectif du TT actuel

Tableau IV.6 : Comparaison des solutions optimales trouvées pour différentes fréquences de commutation

Grandeurs/paramètres	Sol. F_{p0}	Sol. F_{p1}	Sol. F_{p2}	Sol. F_3
Longueur (u.r.)	1.14	0.86	0.86	0.86
Hauteur (u.r.)	0.87	0.92	0.93	0.92
Largeur (u.r.)	0.88	0.93	0.88	0.92
Rcm (u.r.)	0.87	1.17	1.22	1.23
N1 (u.r.)	1.31	0.73	0.67	0.66
L1 (u.r.)	0.96	0.96	1.04	1.09

E1 (u.r.)	0.68	0.51	0.47	0.46
L2 (u.r.)	0.94	0.94	1.01	1.04
E2 (u.r.)	1.25	1.11	0.97	0.95
e_canal1 (u.r.)	1.27	1	1	1
e_ecran (u.r.)	1	1	1	1
Masse TT (u.r.)	0.94	0.84	0.84	0.85
Volume cuve (u.r.)	0.88	0.73	0.73	0.74
Lf (u.r.)	1	0.6	0.52	0.5
max(T_pr) (u.r.)	0.93	0.89	0.86	0.84
max(T_sc) (u.r.)	0.99	0.93	0.9	0.88
Fp (u.r.)	1	1.67	2	2.2
Rendement_TT (u.r.)	1	1.01	1.01	1.01
T_IGBT (u.r.)	1	1.06	1.09	1.11
T_diode (u.r.)	1	1.05	1.08	1.10
T cc-pr (u.r.)	104	164	200	200
T cc-sc (u.r.)	108	138	175	178
Pfer (u.r.)	0.82	1.12	1.21	1.23
Mfer (u.r.)	0.83	1.16	1.26	1.29
Masse_aluminium (u.r.)	0.69	0.328	0.31	0.32
Masse_cuivre (u.r.)	1.19	0.63	0.53	0.54
h_enr (u.r.)	1.3	0.71	0.71	0.71
Pj_dc_pr (u.r.)	1.84	1.59	1.48	1.41
Pj_dc_sc (u.r.)	0.94	0.62	0.61	0.59
Pj_ac_pr (u.r.)	0.97	0.84	0.78	0.75
Pj_ac_sc (u.r.)	1.03	0.76	0.73	0.7

ΔI (u.r.)	1	1	0.97	0.91
Rendement_TT+PMCF (u.r.)	**1**	**1.0032**	**1.0024**	**1.002**
D_vie_pr (u.r.)	1.5	2	2.5	2.8
D_vie_sc (ans)	1.13	1.67	2	2.3
Pertes conduction (u.r.)	1	1	0.99	0.98
Pertes commutation (u.r.)	1	1.67	1.99	2.2
Pertes PMCF (u.r.)	1	1.31	1.47	1.56

Pour analyser les résultats donnés dans ce tableau, on va se concentrer sur l'ondulation du courant qui est une contrainte dimensionnante jusqu'à F_{p1} et contraint le produit de l'inductance de fuite par la fréquence. Lorsque la fréquence de commutation augmente, jusqu'à F_{p1}, l'inductance de fuite prend sa valeur minimale qui engendre une ondulation maximale du courant selon l'expression de ΔI donnée dans (IV.43). En effet, en revenant sur l'expression de l'inductance de fuite donnée dans (IV.41) et (IV.42), nous constatons que celle-ci dépend du nombre de spires dans l'enroulement, de la longueur de la spire moyenne, de l'épaisseur des canaux et de l'écran et de la hauteur de l'enroulement. Tous ces paramètres ont une influence directe sur le volume et la masse du transformateur qui est l'objectif de notre optimisation. Donc, pour avoir un transformateur plus léger il faut ramener son inductance de fuite à sa valeur minimale possible.

Pour réduire la valeur de l'inductance de fuite, il faut réduire prioritairement le nombre de spires car selon (IV.41), la valeur de L_f dépend du carré du nombre de spires. La réduction du nombre de spires engendre, selon (IV.32), l'augmentation de la section du noyau ce qui est cohérent avec nos résultats.

La réduction des épaisseurs des canaux et de l'écran a permis de réduire l'inductance de fuite dans les transformateurs obtenus en accord avec (IV.42) mais aussi le diamètre des enroulements par conséquent leurs masses, leurs résistances électriques et leurs pertes Joule pour la composante fondamentale du courant (pertes Joule dc) au primaire et au secondaire.

L'augmentation de la fréquence de commutation jusqu'à F_{p1} a permis la réduction des pertes des harmoniques (pertes par effets de peau) au primaire et au secondaire comme il a été déjà expliqué dans les résultats de l'optimisation mono-objectif. Mais cette augmentation a gonflé les pertes de commutation dans les PMCF sans dégrader le rendement de l'ensemble transformateur et PMCF. En effet, les pertes dans le transformateur ont été réduites de 18% environ en passant de F_{p0} à F_{p1} mais les pertes dans les PMCF ont augmenté de 67%, ce qui est traduit par une légère différence dans les rendements entre les deux solutions trouvées.

La réduction des différentes pertes dans les conducteurs a diminué leurs températures de fonctionnement et augmenté la durée de vie des enroulements, qui est cohérent avec les résultats trouvées dans le Tableau IV.6. Comme signalé précédemment, l'augmentation de la durée de vie du TT est avantageuse économiquement et écologiquement. Pour F_{p1}, on peut réduire le prix et économiser les matériaux d'un transformateur.

Au-delà de F_{p1}, on constate que les pertes dans les PMCF ne cessent d'augmenter alors l'optimiseur cherche à compenser ces pertes en améliorant le rendement du transformateur pour respecter la contrainte sur le rendement de l'ensemble. Ainsi, il réduit d'avantage les nombres de spires et la hauteur des enroulements pour réduire les longueurs des fils utilisés et par conséquent leurs résistances et les pertes comme pour les solutions précédentes ($F_p \leq F_{p1}$). Sauf que la hauteur des enroulements n'a pas pu être réduite davantage et nous avons remarqué que la contrainte de tenue thermique au primaire est devenue active. En effet, ceci peut être expliqué par la fait qu'en réduisant la hauteur des conducteurs, on réduit leurs masses et on augmente la densité de courant qui les parcours. Par conséquent leurs températures en court-circuit augmentent conformément à (IV.58).

Pour garder une hauteur des enroulements constante avec moins de spires, les conducteurs doivent avoir une hauteur axiale plus importante. Ceci tend à augmenter leurs sections et ensuite les pertes par effet de peau. Pour compenser l'augmentation de la section, il faut réduire l'épaisseur radiale des conducteurs dans le sens radial ce qui est cohérent avec les résultats du Tableau IV.6.

L'optimisation bi-objective montre des résultats intéressants pour améliorer le rendement de l'ensemble transformateur et PMCF et la masse du transformateur. L'analyse des solutions a montré que l'augmentation de la fréquence de commutation permet de réduire l'inductance de fuite du transformateur et sa masse.

La fréquence de commutation F_{p1} permet d'avoir le transformateur le plus léger sans dégrader les performances techniques de l'ensemble. Au-delà de cette fréquence, les transformateurs trouvés sont plus lourds afin de compenser l'amplification des pertes par commutation dans les PMCF en maintenant des rendements de l'ensemble similaires.

IV.6. Analyse de la sensibilité des résultats

IV.6.1. Influence du critère environnemental

Avant de démarrer l'éco-conception, les questions du choix du critère environnemental et de l'influence de ce choix sur les résultats de l'optimisation se sont posées. Le modèle environnemental étant capable de quantifier les 11 impacts environnementaux estimés par EIME et d'autres critères agrégés trouvés dans la littérature, il a été décidé de lancer plusieurs optimisations avec des critères environnementaux différents puis de faire une analyse de sensibilité *a posteriori*.

Dans cette section nous avons comparé les résultats de l'éco-conception du transformateur de traction avec trois critères environnementaux différents. Ces critères à

minimiser sont les émissions de gaz à effet de serre, i.e. contribuant au réchauffement climatique (Global Warming, GW), l'énergie sur le cycle de vie (W_{LCA}) et l'impact agrégé (EI) calculé par la méthode Impact 2002+ décrite dans le chapitre II.

Le deuxième critère de l'optimisation est la masse du transformateur qui traduit son aspect économique. En effet, pour une même technologie de fabrication, la masse des matériaux utilisés lors de la fabrication du transformateur permet d'estimer son coût.

Problème d'éco-conception

Ce problème est transformé en un problème d'optimisation qui consiste à trouver un ensemble de compromis entre le critère économique du TT et sa performance environnementale. Les contraintes de ce problème d'optimisation sont celles présentées dans le cahier des charges. Le modèle multidisciplinaire élaboré permet de calculer le critère économique, les contraintes de l'optimisation et les onze impacts environnementaux décrits dans le modèle environnemental du transformateur.

Les critères GW et W_{LCA} sont exprimés directement dans notre modèle par les impacts GW et ED. Quant au critère EI, il est calculé par une somme pondérée des onze impacts. Les coefficients de pondération sont ceux donnés dans la méthode Impact 2002+. La Figure IV.38 montre la procédure d'optimisation avec le critère EI.

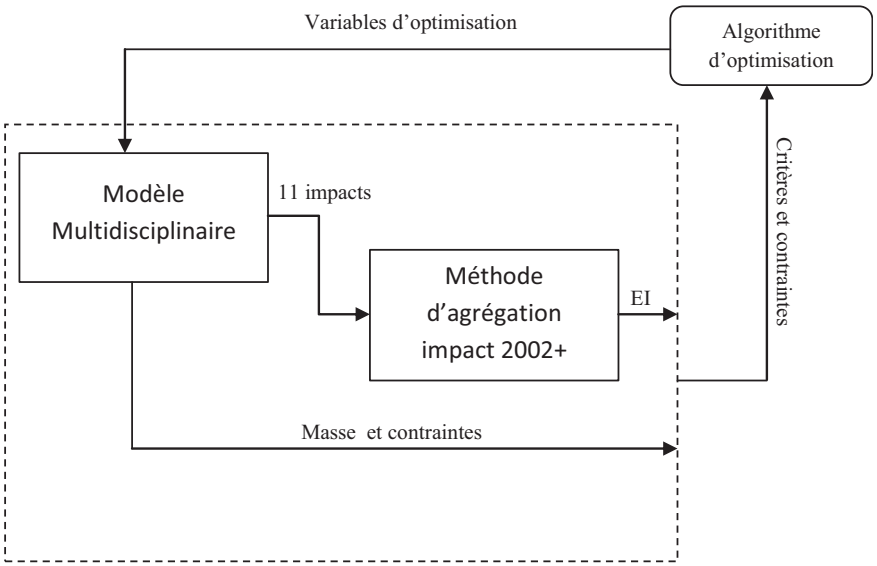


Figure IV.38 : procédure d'optimisation avec le critère EI

Résultats de l'éco-conception

Pour comparer les résultats de l'optimisation, les fronts de Pareto obtenus avec les trois critères environnementaux sont superposés dans le graphe présenté sur la Figure IV.39.

Cette dernière montre que les trois fronts sont quasiment superposés avec le front obtenu par l'optimisation des pertes dans le transformateur. Ces pertes sont représentatives de la consommation d'énergie à puissance utile fixée lors de la phase d'utilisation. Du fait que la phase d'utilisation est très longue et consomme beaucoup d'énergie, les résultats obtenus par

maximisation du rendement ou minimisation de l'indicateur ED (ou W_{LCA}) sur le cycle de vie sont fortement corrélés. De même, les gaz à effet de serre intervenant dans l'estimation de l'indicateur GW sont principalement produits par les pertes lors de la phase d'utilisation et sont également corrélés à l'indicateur W_{LCA}. Enfin, le choix de l'indicateur environnemental (IE) agrégé calculé par la méthode Impact 2002+ comme critère environnemental conduit aux mêmes résultats pour les raisons évoquées précédemment et du fait qu'il s'agit d'une somme pondérée d'indicateur dont la plupart sont corrélés à la consommation d'énergie.

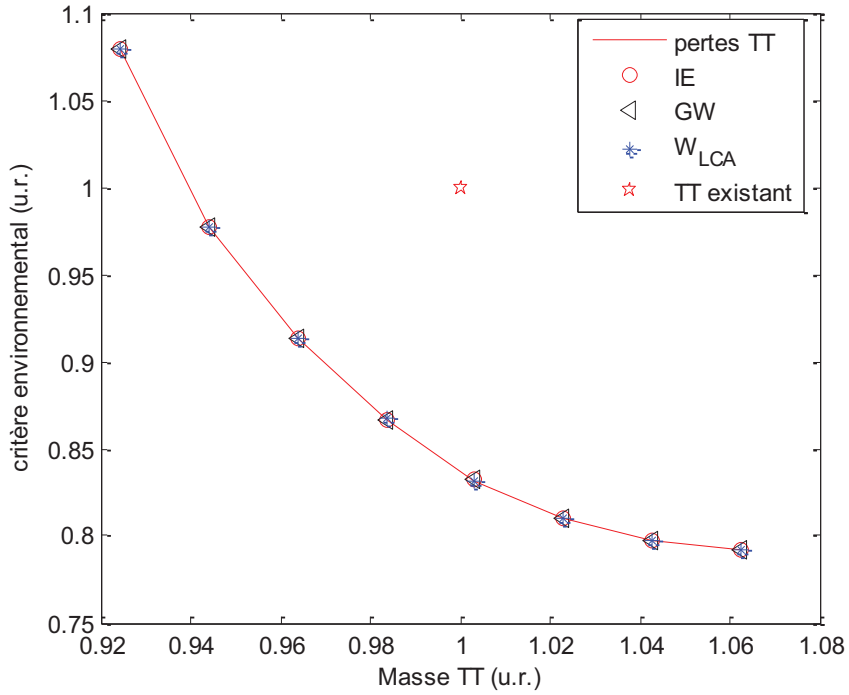


Figure IV.39 : Superposition des fronts obtenus avec trois critères environnementaux

Pour conclure sur la sensibilité des résultats au choix du critère environnemental, nous pouvons dire que dans le cas du TT de la chaine de traction du Tram Train, le choix du critère environnemental n'a pas d'influence sur les résultats de l'optimisation parce que ce dernier possède une grande durée de vie et consomme beaucoup d'énergie. Par conséquent, nous pouvons dire que l'amélioration de la performance environnementale du transformateur revient à améliorer son efficacité énergétique. Ces résultats sont cohérents avec ceux trouvés dans [RBA-10].

IV.6.1. Changement d'un matériau

Changement du cuivre par l'aluminium

Notre objectif dans cette section est de tester l'influence du changement d'un matériau sur les résultats de l'optimisation du TT. Le transformateur actuel contient des enroulements en cuivre et en aluminium. Nous pensons qu'il serait intéressant de remplacer le cuivre par l'aluminium parce que cette solution parait plus attirante économiquement.

L'optimisation bi-objectif a été reprise avec les mêmes objectifs fixés que lors l'optimisation du TT+PMCF mais en remplaçant le cuivre dans les enroulements secondaires par de l'aluminium. Les résultats de l'optimisation sont donnés dans la Figure IV.40.

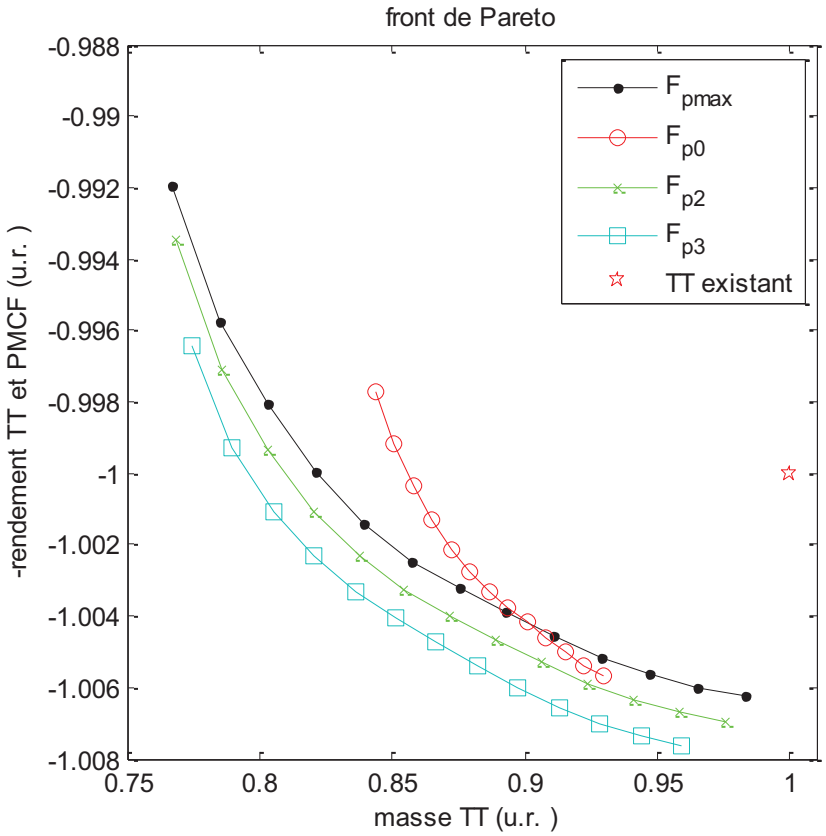


Figure IV.40 : Résultats de l'optimisation bi-objectif du TT en aluminium

Les premières constatations tirées de cette Figure IV.40 montrent que les solutions en aluminium sont plus intéressantes en terme de masse que le TT actuel et que les meilleurs rendements sont obtenues pour une fréquence de commutation F_{p4}, en comparaison aux résultats de l'optimisation précédente (TT en aluminium et en cuivre) qui révèlent que la fréquence optimale de commutation des IGBT est F_{p3}.

Pour expliquer cette différence, nous sommes revenus à l'équation (IV.34) qui montre que les conducteurs en aluminium et en cuivre ne possèdent pas les mêmes profondeurs de pénétration dont l'évolution en fonction de la fréquence est montrée sur la Figure IV.41.

Cette figure montre que l'effet de peau est moins important dans les conducteurs en aluminium que dans ceux en cuivre ; c'est-à-dire que, en termes d'effet de peau, l'aluminium est plus intéressant que le cuivre. Il est donc plus avantageux d'augmenter la fréquence de commutation lorsqu'on a des enroulements en aluminium. Or sur la Figure IV.40 nous trouvons une fréquence de commutation F_{p3} inférieure à celle trouvée pour le TT qui a des enroulements en cuivre.

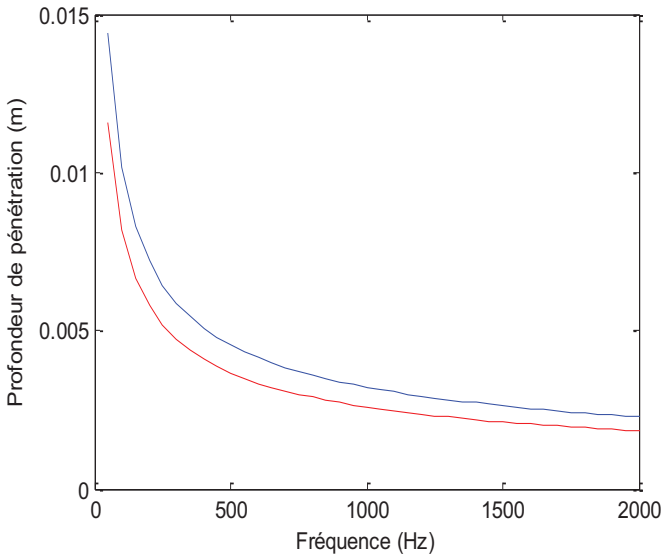


Figure IV.41 : Evolution de l'épaisseur de peau pour l'aluminium et le cuivre en fonction de la fréquence

Pour voir l'effet du changement du cuivre par l'aluminium nous proposons de comparer sur la Figure IV.42 quelques fronts optimaux obtenus pour des TT avec des secondaires en cuivre et des TT avec secondaires en aluminium.

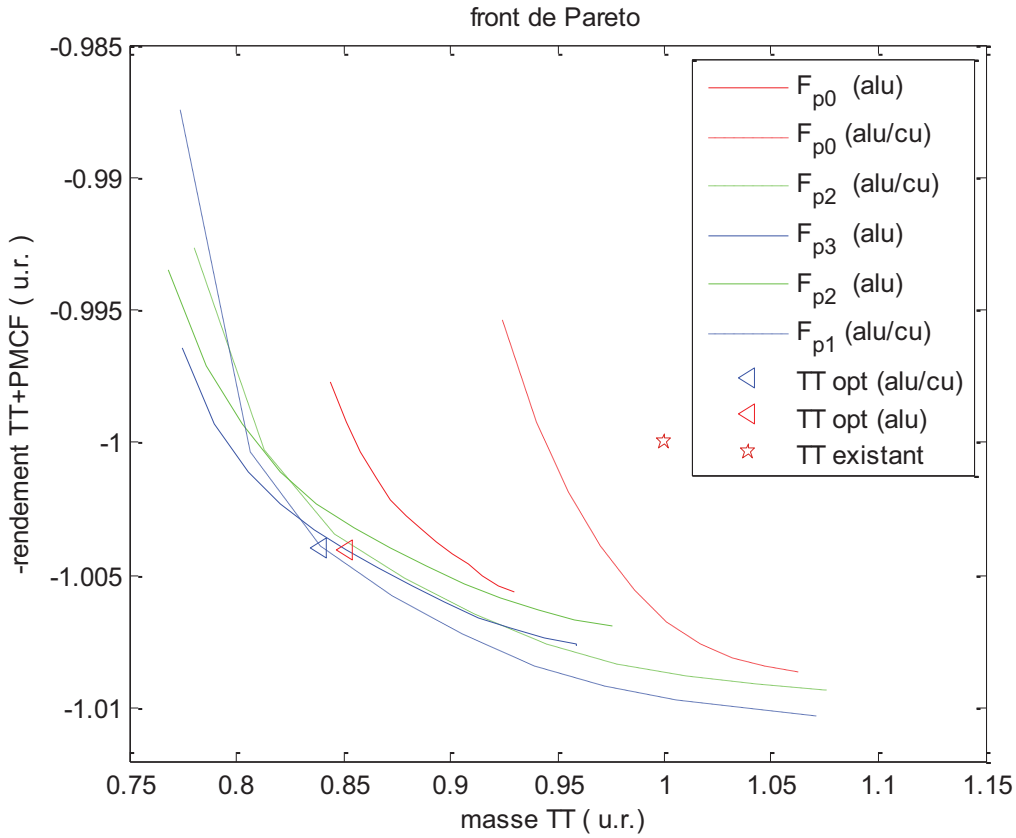


Figure IV.42 : Comparaison de quelques fronts pour des TT avec des secondaires en cuivre à des TT avec des secondaires en aluminium pour quelques fréquences de commutation

Pour voir encore de plus près, les deux solutions « TT opt (alu/cu) » (primaires en aluminium et secondaires en cuivre) et « TT opt (alu) » (primaires et secondaires en aluminium) représentées dans la Figure IV.42 nous les comparons dans le Tableau IV.7.

Tableau IV.7 : Comparaison du TT en aluminium avec un TT avec primaire en aluminium et secondaire en cuivre

Grandeurs/paramètres	TT aluminium	TT aluminium/cuivre
Longueur (u.r.)	0.88	0.85
Hauteur (u.r.)	0.97	0.92
Largeur (u.r.)	0.97	0.92
Rcm (u.r.)	1.170	1.173
N1 (u.r.)	0.736	0.730
L1 (u.r.)	1.04	0.96
E1 (u.r.)	0.57	0.51
L2 (u.r.)	1.01	0.94
E2 (u.r.)	1.66	1.11
e_canal1 (u.r.)	0.78	0.75
e_ecran (u.r.)	0.8	0.8
Masse TT (u.r.)	**0.85**	**0.84**
Volume cuve (u.r.)	0.84	0.73
Lf (u.r.)	0.64	0.60
max(T_pr) (u.r.)	0.86	0.89
max(T_sc) (u.r.)	0.96	0.93
Max(Cij) (u.r.)	0.32	0.27
Fp	F_{p3}	F_{p1}
Rendement_TFP (u.r.)	**1**	**1**
T_IGBT (u.r.)	1.05	1.06
T_diode (u.r.)	1.04	1.05
Toil_sup (u.r.)	0.94	0.95

Pfer (u.r.)	1.17	1.12
Mfer (u.r.)	1.2	1.16
Masse_aluminium pr (u.r.)	0.41	0.33
Masse_aluminium sc (u.r.)	0.33	-
Masse_cuivre sc (u.r.)	-	0.63
h_enr (u.r.)	0.77	0.72
Pj_dc_pr (u.r.)	1.32	1.59
Pj_dc_sc (u.r.)	0.62	0.62
Pj_ac_pr (u.r.)	0.74	0.84
Pj_ac_sc (u.r.)	0.88	0.76
Rendement_TFP+PMCF(u.r.)	**1.003**	**1.003**
D_vie_pr (u.r.)	2.37	2
D_vie_sc (u.r.)	1.41	1.67
Pertes_PMCF (u.r.)	1.26	1.31
IE (u.r) sur 30 ans	0.77	0.75

Le transformateur en aluminium est légèrement plus lourd (1%) que le transformateur avec des enroulements primaire en cuivre et des enroulements secondaires en aluminium. Le remplacement du cuivre par l'aluminium a permis d'économiser 4% de la masse du transformateur. Mais en contrepartie, la solution exclusivement en aluminium est plus volumineuse et nécessite donc une cuve plus grande, un couvercle et des plateaux plus grands, et plus d'huile soit au total, une masse supplémentaire de 5% environ de la masse du transformateur actuel.

En comparant les deux enroulements primaires des deux transformateurs, nous constatons que la section des fils dans le transformateur en aluminium est plus grande que celle dans l'autre solution (primaire en aluminium aussi) ce qui a engendré une diminution des pertes fondamentales dans le primaire de 25% environ.

La section des fils dans le secondaire en aluminium est plus grande de 59% que celle dans l'enroulement en cuivre. En effet, l'aluminium possède une résistivité 1.5 fois plus élevée que celle du cuivre donc pour compenser l'effet de cette différence en résistivité la section des conducteurs en aluminium au secondaire a été augmentée de 158% environ par rapport à celle utilisée dans les conducteurs en cuivre. Ce qui explique les valeurs très proche des pertes fondamentales dans les deux enroulements secondaires en cuivre et en aluminium.

En regardant les pertes en régime alternatif dans les deux secondaires en aluminium et en cuivre nous remarquons que ces pertes sont plus importantes dans les enroulements en

aluminium. Ceci peut être dû à deux choses : La première c'est qu'en utilisant des conducteurs plus épais les pertes par effet de proximités augmentent. La deuxième, c'est qu'en travaillant avec des sections plus grandes les pertes par effet de peau augmentent. D'où l'intérêt de baisser la fréquence de commutation comme il a fait l'optimiseur dans ce cas.

Cette augmentation de section des fils au secondaire a pu compenser la résistivité élevée de l'aluminium en régime continu mais elle a engendré des pertes par effet de proximité et des pertes par effet de peau supplémentaires en régime alternatif. En conséquence, les pertes dans les enroulements secondaires de la solution en aluminium ont augmenté de 10.8%.

En faisant le bilan des pertes dans les deux solutions, nous trouvons que les pertes supplémentaires engendrées par le changement du cuivre par l'aluminium dans le secondaire ont été compensées par un gain lié à l'augmentation de la section des fils primaires et un autre gain sur les PMCF en faisant baisser la fréquence de commutation.

La commutation à F_{p3} au lieu de F_{p1} a permis la diminution des pertes dans les PMCF reliés au TT en aluminium ce qui a contribué à baisser les températures de jonction des diodes et des IGBT.

Sur le plan thermique, les pertes supplémentaires de 10.8% au secondaire ont réchauffé les enroulements secondaires de 3.31% environ par rapport au secondaire en cuivre et la diminution des pertes primaires a fait chuter la température des enroulements primaires de 4.2 % environ.

L'indice environnemental du transformateur avec un secondaire en cuivre est meilleur que celui du TT en aluminium. En effet, les deux transformateurs ont le même rendement et donc, au niveau de la phase d'utilisation, ont les mêmes impacts. Dans la phase de fabrication nous savons que le cuivre est moins polluant. En effet, le cuivre possède des indices d'impacts POC, GW, ED, HWP et WE plus faibles que ceux de l'aluminium ce qui explique la différence entre les deux indices environnementaux des deux TT.

Economiquement le TT en aluminium est plus attractif même s'il est légèrement plus lourd parce qu'en regardant le cours des métaux (2012) nous constatons que le cuivre est environ 3.5 fois plus cher que l'aluminium, c'est-à-dire que le prix du cuivre investi uniquement dans un secondaire d'un seul TT est équivalent au prix de l'aluminium utilisé pour fabriquer les enroulements primaires et secondaires de 4 TT en aluminium.

Changement de l'aluminium par le cuivre

On sait que le cuivre est environ 1.5 fois plus conducteur que l'aluminium. Donc, le remplacement de l'aluminium dans le primaire peut aboutir à une solution plus intéressante en masse.

Différentes optimisations ont été lancées pour différentes valeurs de la fréquence de commutation F_p et les fronts obtenus sont présentés dans la Figure IV.43

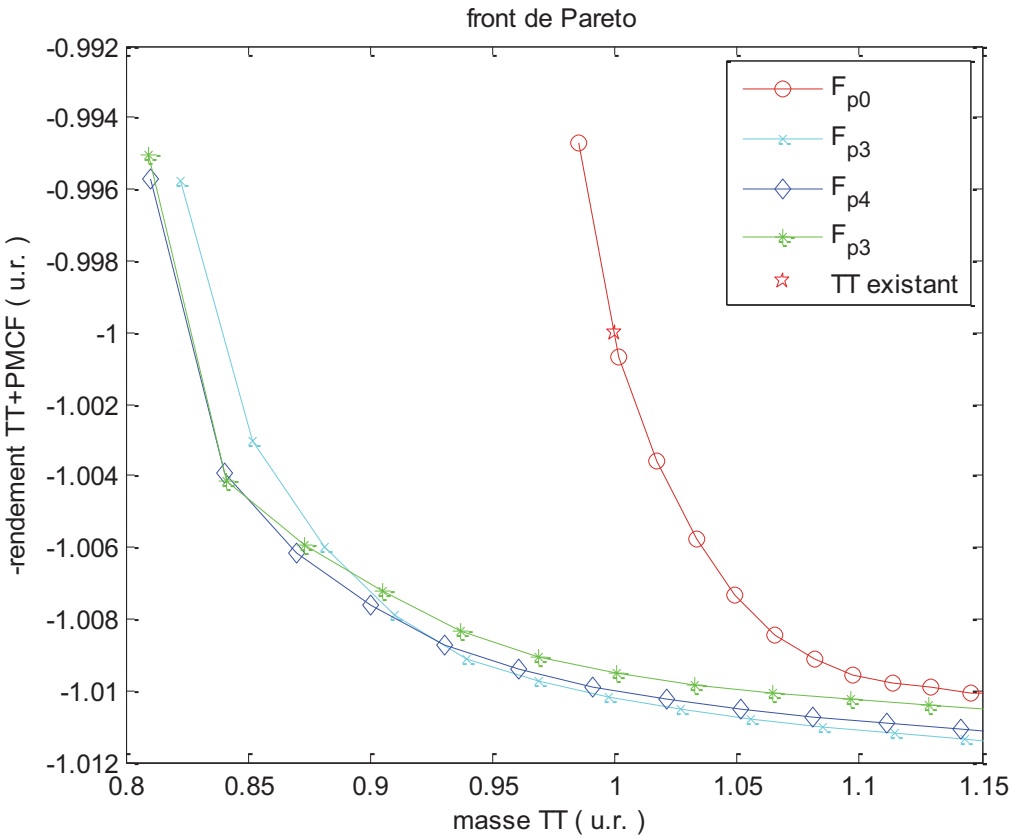


Figure IV.43 : Résultats de l'optimisation bi-objective du TT en cuivre

Les résultats montrent que le remplacement du TT existant par un autre plus léger avec des enroulements en cuivre et ayant les mêmes performances entrainera certainement le non-respect de certaines contraintes si on reste avec la fréquence de commutation actuelle F_{p0}. En effet, le TT existant est déjà sur le front qui représente les solutions optimales pour cette fréquence de commutation.

La fréquence de commutation qui donne les solutions les plus intéressantes est F_{p4}. Cette fréquence est supérieure à celle trouvée pour l'aluminium malgré le fait que nous ayons évoqué précédemment que les pertes par effet de peau soient plus importantes dans le cuivre que dans l'aluminium pour un courant de fréquence élevée. En effet, par rapport au TT en aluminium, l'optimiseur a choisi d'augmenter la fréquence de commutation pour le TT avec des enroulements en cuivre afin de réduire la section des conducteurs et leur masse. Cette diminution de section engendre une augmentation de la résistance des enroulements mais la meilleure conductivité du cuivre par rapport à l'aluminium vient contrebalancer cette conséquence.

Comparaison des meilleurs fronts

La comparaison des trois fronts optimaux donnants les meilleures solutions pour les trois TT (en aluminium (F_p= F_{p3}), en cuivre (F_p = F_{p4}), cuivre et aluminium (F_p = F_{p2})) est présentée dans la Figure IV.44.

Cette dernière montre que les TT en aluminium qui possèdent des masses inférieures à 84 % de la masse du TT existant et des performances énergétiques supérieures ou égales à celles du transformateur actuel sont plus intéressantes. En effet, ces solutions sont plus légères que les autres solutions mais qui offrent le même rendement de l'ensemble TT+PMCF.

Au-delà de cette masse (84% de la masse du TT existant), ce sont les solutions en cuivre qui deviennent plus intéressantes en termes de rendement de l'ensemble TT+PMCF. En effet, ces solutions sont plus lourdes mais qui offrent des rendements du TT+PMCF meilleurs.

Les TT en cuivre et en aluminium possèdent des caractéristiques intermédiaires entre les solutions en cuivre seul et en aluminium seul.

Ces résultats peuvent être expliqués par les différences des résistivités et des masses volumiques du cuivre et de l'aluminium.

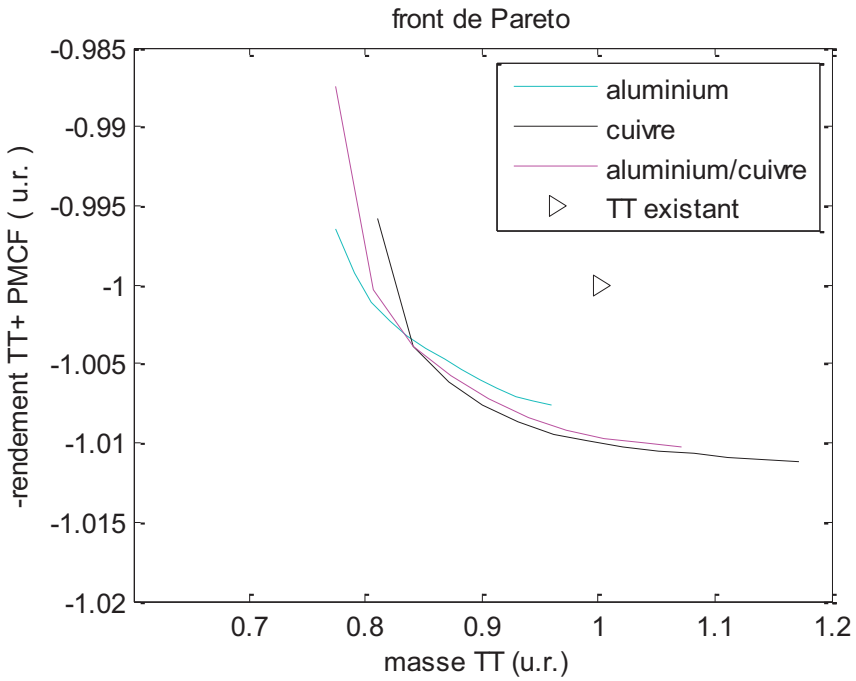


Figure IV.44 : Comparaison des trois fronts qui donnent les meilleures solutions pour les différents transformateurs

IV.7. Conclusion

Tous les modèles électrique, thermique, magnétique, environnemental, mécanique, de vieillissement et mécanique des fluides du PMCF et du TT ont été élaborés pour calculer les objectifs et les contraintes fixés dans le cahier des charges de l'optimisation qui vise à l'éco-conception de la chaine de traction du Tram Train. Les différentes grandeurs dans le

transformateur et le PMCF dépendent de la fréquence de commutation des IGBT. En effet, les fréquences des harmoniques de courant augmentent avec la fréquence de commutation, contrairement à leurs amplitudes qui diminuent avec l'augmentation de la fréquence de commutation du PMCF.

Les résultats de l'optimisation de l'ensemble transformateur et les PMCF montrent qu'une amélioration de l'efficacité énergétique globale est possible à masse identique. Cette amélioration, estimée à moins de 1%, augmente la performance environnementale des deux composants sans dégrader la performance électrique des autres composants (moteurs et onduleurs) car les valeurs de la tension et du courant dans le bus continu n'ont pas été modifiées. Ainsi, la performance environnementale de de l'ensemble TT et PMCF peut être améliorée de 25%. Il est également possible d'alléger la masse du transformateur de 15% environ sans dégrader son efficacité énergétique. En plus, la Figure IV.37 montre qu'une amélioration simultanée des deux objectifs (alléger la masse et améliorer l'efficacité énergétique) est aussi possible. Ces améliorations se font en modifiant la géométrie, les matériaux du transformateur et la fréquence de commutation dont la valeur optimale est F_{p3} pour un TT en aluminium et F_{p4} pour un TT en cuivre.

La substitution du cuivre par l'aluminium semble être la solution la plus attirante en points de vue économique. Ecologiquement, cette solution est bien meilleure que le TT existant est légèrement moins bon que la solution en cuivre qui représente la meilleure solution écologique.

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse visent l'éco-conception de la chaine de traction du Tram Train en exploitant les outils d'optimisation. Nous nous sommes concentrés sur le transformateur de traction (TT) et le redresseur d'entrée nommé aussi Pont Monophasé à Commutation Forcée (PMCF) parce que les résultats de l'analyse de cycle de vie (ACV) ont montré que ces deux composants sont les plus impactants sur l'environnement parmi ceux de cette chaine de traction.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté l'état de l'art de l'éco-conception. Elle consiste à intégrer les impacts environnementaux sur le cycle de vie d'un produit dès sa phase de conception dans le but est de réduire ces impacts environnementaux. Pour évaluer et identifier les différents impacts sur le cycle de vie, un outil multicritères nommé analyse de cycle de vie est exploité. Le produit étudié est une chaine de traction ferroviaire. Ainsi, il était indispensable de présenter dans ce chapitre les différentes normes, directives et législations environnementales en vigueur dans le domaine ferroviaire parce qu'elles présentent des contraintes environnementales à intégrer dans la nouvelle conception de la chaine. Un problème d'éco-conception d'un composant ferroviaire peut être traduit à un problème d'optimisation parce que généralement un tel produit possède un ou plusieurs modèles. Les outils d'optimisation (méthodes et formulations) qui peuvent être adaptés et exploités pour la résolution d'un tel problème sont également présentés dans ce chapitre. En effet, dans un problème d'éco-conception d'un convertisseur électromagnétique, il faut exploiter les formulations multidisciplinaires (MDO). Le choix de la formulation la plus adaptée au problème d'éco-conception dépend du type des modèles utilisés (MDF pour les modèles analytiques et IDF pour les modèles EF). Pour les algorithmes d'optimisation, il est plus judicieux de choisir des algorithmes bi-objectifs et qui sont capables de traiter des problèmes d'optimisation NP difficiles (dizaines de variables). Nous soulignons ici que le choix de l'algorithme dépend aussi comme les formulations du type des modèles (dans notre cas SQP pour les modèles analytiques et le SM pour les modèles EF).

Dans le deuxième chapitre, nous avons réalisé l'ACV de la chaine de traction du Tram Train. Cette analyse a été réalisée à l'aide du logiciel de gestion environnementale EIME®. Grâce à ce logiciel, la tâche la plus lourde qui est l'inventaire de cycle de vie (ICV) a été allégée et 11 impacts environnementaux de la chaine ont été calculés. Les résultats ont montré que le transformateur de traction (TT) est le composant le plus polluant dans cette chaine de traction. La résolution d'un problème d'optimisation qui a 11 critères environnementaux s'avère compliqué. Pour surmonter ce problème, nous avons sélectionné une méthode d'agrégation d'impact nommée impact 2002+ qui permet d'obtenir, par une agrégation de ces 11 impacts, un indicateur environnemental unique.

Un problème d'éco-conception d'un convertisseur électromagnétique est traduit souvent par un problème d'optimisation dont les deux critères représentent un aspect écologique et un aspect économique. Ces deux aspects sont généralement conflictuels (l'amélioration de l'un des critères engendre la dégradation de l'autre). De plus, les modèles utilisés sont des modèles lourds et complexes notamment dans le cas des composants

ferroviaires. Pour surmonter ces problèmes, nous avons présentés, dans le troisième chapitre, les outils de l'optimisation qui peuvent nous servir dans l'éco-conception de tels composants. Les trois formulations d'optimisation multidisciplinaire (*multidisciplinary design optimization*, MDO) mono-niveau sont présentées et testées sur le benchmark d'un transformateur monophasé. Les meilleures formulations (MDF+FP, IDF) ont été associées à la technique d'optimisation multi-niveau de granularité appelée *output space-mapping* (OSM). Cette association a révélé que la formulation IDF est la plus intéressante à utiliser avec OSM pour résoudre des problèmes d'optimisation des convertisseurs électromagnétiques y compris ferroviaires dont une évaluation du modèle fin peut durer des heures. Nous avons proposé également une technique d'OSM étendue qui consiste à introduire des modèles qui ont des caractéristiques intermédiaires (précision et temps de calcul) entre les deux modèles (grossier et fin) utilisés classiquement dans OSM. La technique proposée a été testée sur deux benchmarks. Le premier est celui du transformateur monophasé et le deuxième est celui d'un système de stockage d'énergie magnétique connu par la communauté COMPUMAG sous la référence « *TEAM workshop problem* #22 ».

Le quatrième chapitre a été consacré à l'optimisation du transformateur de traction (TT) et du PMCF de la chaine de traction du Tram Train. Un cahier des charges a été élaboré avec des experts d'ALSTOM TRANSPORT dans le but d'améliorer la performance environnementale des deux composants tout en garantissant leurs fonctionnalités habituelles et sans affecter le fonctionnement des autres composants de la chaine de traction. La performance environnementale est représentée par le rendement de l'ensemble. Pour faire l'optimisation, des modèles multi-physiques ont été élaborés pour le TT et le PMCF. Ces modèles tiennent compte de l'interdépendance de ces deux composants et ils permettent de calculer tous les objectifs et les contraintes fixés dans le cahier des charges. Les résultats de l'optimisation ont montré qu'une amélioration des aspects environnementaux et économiques des composants existants est possible. D'autres pistes d'amélioration de la performance environnementale de la chaine de traction, mises en évidence lors de l'ACV, ont été également investiguées dans ce chapitre tel que le changement des matériaux. L'investigation des différentes pistes montre des améliorations potentielles plus au moins remarquables.

En ce qui concerne les perspectives, nous proposons des améliorations sur trois axes pour aboutir à des résultats plus pertinents.

Les hypothèses utilisées lors de la construction des modèles ont des conséquences sur les résultats obtenus. Ainsi, plusieurs améliorations des modèles sont proposées et les gains escomptés sont mentionnés.

Le modèle thermique élaboré dans cette étude est un modèle statique utilisé dans le calcul des températures au point de fonctionnement nominale. En réalité les constantes de temps des phénomènes thermiques dans le Tram Train sont supérieures aux durées d'accélération et décélération. Pour prendre en compte les transitoires thermiques, il faut élaborer un modèle dynamique et réaliser une simulation sur un cycle de fonctionnement. Cette simulation permettra d'estimer les températures maximales atteintes dans le transformateur qui seront

inférieures à celles calculées par notre modèle statique. En effet, le transformateur absorbe une partie des calories avec son inertie thermique et a donc moins de chaleur à évacuer lors de sa montée en température. Une conséquence sur les résultats d'optimisation sera un transformateur plus léger mais avec des températures maximales (des contraintes actives).

Dans notre modèle du transformateur, nous avons considéré que la vitesse de l'huile dans les canaux est la même et est égale à la vitesse globale. Cette hypothèse est faite pour alléger davantage le modèle et les calculs au cours des optimisations. Un modèle mécanique des fluides plus fin et capable de déterminer la vitesse de l'écoulement de l'huile ester Midel® dans chaque canal, peut être élaboré. Avec ce nouveau modèle, les coefficients d'échange thermique seront calculés pour chaque canal et une meilleure estimation des températures des conducteurs et des isolants sera obtenue. Une conséquence sera un meilleur dimensionnement du transformateur, une estimation plus juste de la durée de vie du transformateur, et la possibilité d'ajouter la pompe dans l'optimisation de l'ensemble pour aboutir à une réduction globale des masses et pertes.

Les coefficients de couplage entre secondaires sont aussi estimés par une approximation analytique. Les formules analytiques ne sont pas très précises pour le calcul des champs de fuite entre secondaires. Ainsi, l'exploitation des modèles éléments finis peut aboutir à des résultats plus précis au prix d'un temps de calcul va être amplifié. Pour remédier à ce problème, les techniques de Space Mapping peuvent être exploitées pour obtenir des résultats avec une bonne précision dans un temps de calcul raisonnable.

La seconde priorité est l'amélioration des algorithmes. Le nombre des variables discrètes dans le transformateur étant faible (4), il a été possible d'optimiser le transformateur en explorant de façon exhaustive toutes les combinaisons possibles. Il en résulte un temps de calcul inutilement important et un travail de post-traitement des résultats qui pourrait être évité. De plus, le nombre de variables discrètes peut évoluer en fonction du cahier des charges et rendre indispensable l'exploitation d'algorithmes d'optimisation, tel que *branch and bound*, capables de traiter des variables mixtes (continues et discrètes). En effet, dans les dispositifs que nous avons optimisés, certaines variables possèdent un caractère discret mais classable (nombre de canaux d'huile, nombre de couche) alors que le type d'un matériau (huile de refroidissement, conducteur) est non classable.

Enfin, nous aimerions que la démarche développée puisse être intégrée dans l'outil métier CITHEL® d'ALSTOM TRANSPORT. En effet, ce logiciel peut calculer les pertes d'une chaine de traction sur un parcours donc les pertes accumulées sur la durée de vie de la chaine peuvent être déduites et par conséquent ses impacts environnementaux lors de la phase d'utilisation. Pour les impacts de la phase de fabrication, ils pourraient être calculés par CITHEL® en intégrant des informations supplémentaires telles que les quantités des matériaux utilisées dans les différents composants et une base de données environnementale ou en saisissant directement les impacts pour chaque composant. CITHEL® pourrait également être couplé avec Matlab® afin de rendre possible l'utilisation des algorithmes d'optimisation qui s'y trouvent.

Bibliographies

[AFN-08] : AFNOR association française de normalisation, « analyse de cycle de vie », révision juin 2008 P25.

[ALE-99] : N.M. Alexandrov and R.M. Lewis, "Comparative properties of collaborative optimization and other approaches to MDO", In proceedings of the First ASMO UK/ISSMO Conference on Engineering Design Optimization, July 1999.

[ALL-96] : P. Alotto, A.V. Kuntsevitch, Ch. Magele, G. Molinari, C. Paul, K. Preis, M. Repetto, K.R. Richter, "Multiobjective optimization in magnetostatics: a proposal for benchmark problems", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32, No 3, pp. 1238-1241, May 1996.

[ALS-08] : Alstom transport R&D, « Legal Provision on Dangerous Subtances Control », version 2, date d'application 12/09/2008.

[AKL-08] : C.R. Akli, « Conception systémique d'une locomotive hybride autonome. Application à la locomotive hybride de démonstration et d'investigations en énergétique HyDIE développée par la SNCF », Thèse de doctorat délivrée par l'institut national polytechnique Toulouse le 27 Juin 2008.

[ANG-05] : E. Angel, P. Christopoulos, V. Zissimopoulos, « Recherche locale : complexité et approximation. Optimisation combinatoire 2 concepts avancés », édition Lavoisier, 2005.

[BAN-94] : J.W. Bandler, R.M. Biernacki, H. Chen, P.A. Grobelny and R.H. Hemmers. « Space mapping technique for electromagnetic optimization ». IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 42, no. 12, pp. 2536-2544, December 1994.

[BAN-95] : J.W. Bandler, R.M. Biernacki, S.H. Chen, R.H. Hemmers, and K. Madsen, "Electromagnetic optimization exploiting aggressive space mapping", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 43, no. 12, pp. 2874-2882, 1995.

[BER-09] : A.C. Berbecea, S. Kreuawan, F. Gillon, and P. Brochet, « A Parallel Multiobjective Efficient Global Optimization: The Finite Element Method in Optimal Design and Model Development », IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 8, pp. 2868-2873, 2009.

[BER-11] : A.C., Berbecea, R. Ben Ayed, S. Brisset, F. Gillon, and P. Brochet, « Comparison of Efficient Global Optimization and Output Space Mapping on the bi-objective optimization of a safety isolating transformer », IEEE Transaction on Magnetics, vol 48, no. 2, pp. 791-794.

[BOU-12] : W. Boughanmi, J.P. MANATA, D. Roger, T. Jacq, F. Streiff, "Life cycle assessment of a three-phase electrical machine in continiuos operation, IET electric power applications, vol. 6, Issue 5, pp. 277-285.

[BRA-10] : N. Bracikowski, M. Hecquet, P. Brochet, "Multi-physics modeling of permanent magnet synchronous machine by lumped models", ICEM - International Conference on Electrical Machines, Rome, Italy, september 2010 (from CD-ROM).

[CAR-90] : R.L. Carraway, T.L. Morin and H. Moskowtiz, « Generalized dynamic programming for multicriteria optimization », European Journal of Operational Research, 44, pp. 95-104, 1990.

[CEI-765] : Commission Internationale d'Electrotechnique, nome CEI 60076-5 sur la tenue au court-circuit des transformateurs de puissance, troisième édition, février 2006.

[CHA-05] : I. Charon, O. Hudry, « Méthodes arborescentes par séparation et évaluation (Branch and Bound). Optimisation combinatoire 1 Concepts fondamentaux », Edition Lavoisier, 2005.

[CHE-02] : Y. Chen and P. Pillay, « An Improved Formula for lamination core loss calculations in machines operating with high frequency and high flux density excitation », Industry applications conference, 37th IAS Annual Meeting,13-18 October 2002, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.

[COL-02] : Y. Collette, P. Siarry, « Optimisation Multiobjectif » , edition EYROLLES, 2002.

[CON-00] : N.R. Conn, N.I.M. Gould, and P.L. Toint, « Trust-Region Method », MPS/SIAM Series on Optimization, edition SIAM, Philadelphia, 2000.

[CON-08] : J.F. Convers, T.V. Tran, S. Brisset, V. Andries, M. Bekemans, «Ecodesign of an auxiliary transformer for the railway traction », in proceedings of EVER : Ecologic Vehicules Renewable Energies, March 2009.

[CRA-94] : J. Cramer, J. Dennis Jr., P. Frank, R. Lewis, and G. Shubin, "Problem formulation for multidisciplinary optimization", SIAM Journal on Optimization, vol 4, no. 4, pp.754-776, 1994.

[CRA-08] : J. C. Craveur, "Modélisation par éléments finis", Edition Dunod, 3e edition, 2008.

[CRO-05] : F. Della Croce, « Modélisation de problèmes d'optimisation combinatoire à l'aide de la programmation linéaire mixte entière », pp129-135, édition Lavoisier 2005.

[DE-92]: Directive 92/75/CEE du Conseil concernant l'indication de la consommation des appareils domestiques en énergie et en autres ressources par voie d'étiquetage et d'informations uniformes relatives aux produits, Journal officiel n° L 297 du 13/10/1992 p. 0016 – 0019*,* 22 septembre 1992.

[DEB-02] : K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, « A fast and elitist multi-objective genetic algorithm : NSGA-II », IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol 6, no 2, pp. 182–197, 2002.

[DEB-06] : M. Debruyne, « Traction électrique », présentation faite à l'école centrale sur la traction ferroviaire, 2006.

[DEB-07] : V. Debusschere, H. Ben Ahmed and B. Multon, « Eco-design of electromagnetic Energy converters : the case of the electrical transformer », in proceedings of IEMDC'07 : Electric Machines & Drives Conference, pp.1599-1604, Antalya, Turkey, May 2007.

[DEB-09] : V. Debusschere, « Contributions méthodologiques à l'éco-conception des convertisseurs électromagnétiques d'énergie », thèse de doctorat soutenue le 09 Décembre 2009 à l'école normale supérieur de Cachan.

[DEL-10a] : G. Delille, « Contribution du Stockage à la Gestion Avancée des Systèmes Électriques, Approches Organisationnelles et Technico-économiques dans les Réseaux de Distribution », thèse de doctorat soutenue le 18 novembre 2010 à l'école centrale de Lille.

[DEL-10]: C. Delort, « Prétraitement dans les méthodes en deux phases pour la résolution de problèmes bi-objectifs », le 11ème congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF), 24-26 février 2010, Toulouse.

[DOW-66] : P.L. Dowell, « Effects of eddy currents in transformer windings », IEE Proc, pp.1386-1394, August 1966.

[DSM] : DSM: http://www.dsm.com/en_US/html/drs/up.htm.

[DUM-04] : G.F. DUMONT, « la démographie mondiale », conférence présentée à l'école centrale de Lyon le 6-9-2004.

[DUR-68] : E. Durand, « magnétostatique », edition Masson et Cie, Paris, 1968.

[ECH-05] : D. Echeverria, D. Lahaye, L. Encica and P.W. Hemker. « Optimization in electromagnetic with the space mapping technique ». Compel: the international journal for the computation and mathematics in electrical and electronic engineering, vol. 24, no. 3, pp. 952-966, 2005.

[ECH-06] : D. Echeverria, D. Lahaye, L. Encica, E.A. Lomonova, P.W. Hemker, and A.J.A. Vandenput, « Manifold-mapping optimization applied to linear actuator design », IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, no. 4, pp. 1183–1186, April 2006.

[ECO-99] : M. Goedkoop and R. Spriensma, « The Eco-indicator 99 : A damage oriented method for life cycle impact assessment methodology report », PRé Consultants B.V., Third edition, 22 June 2001 (version numérique téléchargée de www.pre.nl) .

[EDG-81] : F.Y. Edgeworth, « Mathematical Physics », Edition P. Keagan, London, 1881.

[ENC-08a] : L. Encica, J.J.H. Paulides, E.A. Lomonova, and A.J.A. Vandenput, "Aggressive output space mapping optimization for electromagnetic actuators", IEEE transactions on magnetics, vol. 44, no. 6, pp. 1106-1109, 2008.

[ENC-08b] : L. Encica, J.J.H. Paulides, E.A. Lomonova, and A.J.A. Vandenput, "Electromagnetic and thermal design of a linear actuator using output polynomial space mapping", IEEE transactions on Industry Applications, vol. 44, no. 2, pp. 534-542, 2008.

[ENG-SO] : EnginSoft France : http://france.enginsoft.com/modefrontier/index.html.

[EPO-HE] : Hearne Scientific Software Pty Ltd : http://www.hearne.com.au/news/128/.

[ERI-04] : R.W. Erickson and D. Maximovie, « Fundamentals of power electronics », second edition, Kluwer Academic Publishers, New York, pp : 474-487, 2004.

[FAS-07] : A. Fasquelle, « Contribution à la modélisation multi-physique : électro-vibro-acoustique et aérothermique de machines de traction », Thèse de doctorat soutenue à l'Ecole Centrale de Lille le 30 novembre 2007.

[FER-99] : J. P. Ferrieux, F. Forest, "Alimentation à découpage, convertisseurs à résonances", Editions Dunod, troisième édition, 1999.

[FLI-05] : C. D. Flipo, « Optimisation Combinatoire multi-objectif : apport des méthodes coopératives et contribution à l'extraction des connaissances », mémoire d'habilitation à diriger les recherches soutenue à l'Université des Sciences et Technologies de Lille le 05 octobre 2010.

[FRA-99] : P.M. França, A.S. Mendes, and P. Moscat, "Memetic algorithms to minimize tardiness on a single machine with sequence-dependent setup times", in proceedings of the 5th International Conference of the Decision Sciences Institute, Athens, Greece, pp. 1708-1710, 1999.

[FRI-99] : P. Fridmann, « Equilibrage des réseaux de distribution », Techniques de l'ingénieur, référence BE 9200, octobre, 1999.

[FUJ-04] : Fuji Electric Device Technology Co., Ltd. : http://w5jgv.com/hv-ps1/pdf/fuji_igbt_application_manual%28REH984%29.pdf (dernière consultation le (12/04/2011).

[FUR-07] : S. Furfari « Le monde et l'énergie Enjeux géopolitiques », Edition Technip, Paris, 2007.

[GEO-68] : A.M. Geoffrion, « Proper efficiency and the theory of vector minimization », Journal of mathematical analysis and applications, vol. 22, no. 3, pp. 618-630, 1968.

[GIE-07] : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), « rapport du groupe de travail 1 du GIEC », février 2007 : http://www.un.org/french/climatechange/ipcc.shtml.

[GIL-09] : F. Gillon, F. Gillon, Méthodologies de Conception Optimale des Composants Electromagnétique, rapport de l'habilitation à diriger des recherches (HDR), Ecole Centrale de Lille, 07 Décembre 2009.

[GOL-88] : D. E. Goldberg and J.H. Holland, « Genetic Algorithms and Machine Learning », Kluwer Academic Publishers - Manufactured in The Netherlands, Machine Learning 3, pp. 95-99, 1988.

[GON-12] : J. Gong, R. Ben Ayed, F. Gillon, S. Brisset, P. Brochet, "Three-Level Adapted Output Space Mapping Technique for Two-Objective Optimization", in proceedings of Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, Funchal, Madeira, 1-3 september 2011. (from CD-ROM). (l'article complet a été retenu pour être publier à « Electrical Review Journal »).

[HAI-71] : Y.Y. Haimes, L.S. Lasdon, D.A. Wismer, « On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization », IEEE Transaction on System, vol. 1, no. 3, pp. 296-297, 1971.

[HAT-94] : A. Hatchuel, Apprentissages collectifs et activités de conception, Revue française de gestion, pp. 109-119, 1994.

[HAY-08] : J. El Hayek, « Magneto harmonic model of a dual frequency single phase 27 kVA laboratory multi-windings traction transformer », in proceedings of the International Conference on Electrical Machines, 2008 (from CD-ROM).

[HEU-92] : R. Heujungs, J.B. Guinée, G. Huppes, R.M. Lankreijer, H.A. Udo De Haes, A. Wegner Sleeswijk, A.M.M. Ansems, P.G. Eggles, R. Van Duin et H.P. Goede, « Environmental Life Cycle Assessment of Products, Background and Guide », Centre of Environmental Science (CML), NL-2300 RA Leiden: https://openaccess.leidenuniv.nl/handle/1887/8062.

[HOR-94] : J. Horn, N. Nafpliotis, and D.E. Goldberg, « A niched pareto genetic algorithm for multiobjective optimization », in proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionnary Computation, IEEE Press, pages 82–87, Orlando, FL, USA, 1994.

[HUN-97] : J. Hernandez-Gil, « EcoDs » : http://ditwww.epfl.ch/SIC/SA/publications/FI00/fi-1-00/1-00-page2.html. (Consulté le 07/06/2011)

[IMP-02] : O. Jolliet, M. Margni, R. Charles, S. Humbert, G. Payet, G. Rebitzer, R. Rosenbaum, " IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology ", The International Journal of Life Cycle Assessment, pp.324-330, 2003.

[IOS-TE] : XC Engineering Srl, Via Matteotti, 7: http://www.iosotech.com/.

[ISI-EN] : Ingineous Software : http://www.ipe.cuhk.edu.hk/Equipment_list/iSIGHT.htm.

[ISO-14000] : International Organization for Standardization, ISO 14000. Environmental management system. Disponible sur <http://www.iso.org/iso/fr/management_standards.htm> (consulté le 26/07/2010).

[ISO-14040] : Association Française de Normalisation, NF EN ISO 14040. Life cycle assessment - principles and Framework, version Octobre 2006.

[ISO-14044] : Association Française de Normalisation, NF EN ISO 14044. Analyse de cycle de vie Exigences et lignes directives, version Octobre 2006.

[JAN-00] : M. Janin, « Démarche d'éco-conception en entreprise, Un enjeu : construire la cohérence entre outils et processus », thèse de doctorat soutenue à l'Ecole Nationale Supérieur d'Arts et Métiers le 28 avril 2000.

[JOL-03] : O. Jolliet, M. Margni, R. Charles, S. Humbert, G. Payet, G. Rebitzer, R. Rosenbaum, « Impact 2002+ : A new life cycle impact assessment », the international journal of life cycle assessment, pp.324-330, 2003.

[JOL-05] : O. Jolliet. M. Saadé, P. Crettaz, « Analyse de cycle de vie, comprendre et réaliser un écobilan », Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Première édition 2005.

[JON-01] : D.R. Jones, "A taxonomy of global optimization methods based on response surfaces", journal of Global Optimization, vol. 4, no. 21, pp. 345-383, 2001.

[KAZ-09] : M.K. Kazimierczuk, « High frequency magnetic components », John Wiley and sons, Ltd. Publication, pp. 256-265, 2009.

[KNO-00] : J.D. Knowles and D.W. Corne, « Approximating the non-dominated front using the Pareto archived evolution strategy », Evolutionary Computation Journal, vol. 8, no. 2, pp. 149–172, 2000.

[KON-06] : A. Konak, D.W. Coit, A.E. Smith, "Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial", Science Direct, Reliability engineering and safety system, Elsevier Ltd. pp. 992-1007, January 2006.

[KRE-08] : S. Kreuawan, F. Gillon, P. Brochet and L. Nicod, « A multidisciplinary design optimization of a permanent magnet motor », in proceedings of the International Conference on Electrical Machines, Vilamoura, Portugal, 6-9 september 2008 (from CD-ROM).

[KYO-98] : Nations Unies, « Protocole de Kyoto à la convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques», 1998 : http://unfccc.int/cop3/resource/docs/cop3/kpfrench.pdf.

[LES-04] : L. Lescuyer : « EIME un outil d'aide à la conception des produits », technique de l'ingénieur (G6100), octobre 2004.

[LMS-OP] : LMS France : http://www.lmsintl.com/.

[MAG-04] : D. Magot, « Méthodes et outils logiciels d'aide au dimensionnement. Application aux composants magnétiques et aux filtres passifs », thèse de doctorat soutenue à l'Institut National Polytechnique de Grenoble le 28 Septembre 2004.

[MIDEL®] : Midel® : http://www.Midel®.com/productsMidel®.htm.

[MOD-DE] : Phoenix Integration : http://www.phoenix-int.com/software/phx_modelcenter.php.

[MOU-09] : F. Moussouni, « Multi-level and multi-objective design optimization tools for handling complex systems », thèse de doctorat soutenue à Ecole Centrale de Lille le 1 Juillet 2009.

[NASA] : NASA: http://www.nasa.gov/.

[NEI-96] : P. Neittaamäki, M. Rudnicki, and A. Savini, « Inverse problems and optimal design in electricity and magnetism », Oxford University Press Inc., New York, pp. 325-348, 1996.

[NGU-09] : H. NGUYEN-HUU, N. RETIERE, F. WURTZ, X. ROBOAM, B. SARENI, D. ALEJO "Optimal sizing of an embedded electrical system with an approach for limiting the search space", selected paper from OIPE'2008, *International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering* (*COMPEL*), Vol. 28, N°5, pp. 1141-1154, 2009.

[NYN] : valable en ligne : http://www.plattner.co.rs/certifikati/SDS_Nytro_Lyra_X_EN.pdf (consulté le 02/05/2009).

[OFD-91] : l'Office fédérale de la confédération suisse, Loi fédérale n° sur la protection des eaux du 24 janvier 1991 : http://www.admin.ch/ch/f/rs/8/814.20.fr.pdf (consulté le 24/02/2011).

[OFE-04] : J. Kanzig et O. Jolliet, « consommation respectueuse de l'environnement », Editer par L'office fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication, version 2004 p75 : www.environnement-suisse.ch/publications (consulté le (24/02/2012).

[OLI-80] : A.J. Oliver. « Estimation of transformer winding temperatures and coolant flows using a general network method », IEE Proc., vol. 127, no. 6, pp. 395-405, November 1980.

[OPA-86] : le conseil fédéral suisse, Ordonnance n° 814.318.142.1sur la protection d'air du 16 décembre 1985 : http://www.admin.ch/ch/f/rs/8/814.318.142.1.fr.pdf (consulté le 24/02/2012).

[ORG-92] : Organisation mondiale de la santé, « Classification statistique internationale des maladies et des problèmes de santé connexes », Dixième révision volume 2, 1992: http://apps.who.int/bookorders/MDIbookPDF/Book/21500754.pdf (consulté le 27/07/10).

[OPT-SL] : Science+ computing ag: http://www.dynardo.de/optislang.0.html?L=1.

[PAM-OP] : ESI Group, 100-102 : http://www.esi-group.com/products/simulation-systems-integration/pam-opt.

[PAR-96] : V. Pareto, « Cours d'économie politique », Edition F. Rouge, Lausanne, 1896.

[PAR-03] : M.K. Pardhan and T.S. Ramu, « Prediction of hottest spot temperature (HST) in power and station transformers », IEEE transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 4, pp. 1275-1283, October 2003.

[PIC-68] : A. Pichon, "Calcul et construction des machines électriques statiques transformateurs", édition société française des électriciens, 1965.

[PON-08] : M.N PONS, M. BILHENI, J. BOURGOIS, E.DUPUIT : « Epuration des eaux usés urbaines», technique de l'ingénieur référence G5820, Janvier 2008.

[PYR-08] : J. Pyrhönen, T. Jokinen, V. Hrabovcova, « Design of rotating electrical machines », John Wiley and sons, Ltd. Publication, pp. 457-496, 2008.

[RAP-03] : Ministère de l'économie des finances et de l'industrie, Rapport sur la consommation d'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelable en France, Mars 2003 : http://www.adec.fr/files_upload/documentation/200607201136140.rapp-art3.pdf.

[RBA-10]: R. Ben Ayed, S. Brisset "The influence of the environmental criterion on the design of an auxiliary transformer for the railway traction" in Proceedings of ICEM 2010, September 2010, Rome, Italy (from CD-ROM).

[RBA-11] : R. Ben Ayed, A.C. Berbecea, S. Brisset, F. Gillon, P. Brochet, "Comparison between efficient global optimization and output space mapping technique", International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 37, no2-3n, pp. 109-120, 30 September 2011.

[RBA-11a] : R. Ben Ayed, S. Brisset, « Expert Knowledge Benefits on Discrete Optimization Algorithm», in proceedings of Compumag 2011, Sidney, Australia, July 2011. (from CD - ROM).

[RBA-11b] : R. Ben Ayed, S. Brisset, "n-level output space mapping technique", in proceedings of Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, Funchal, Madeira, 1-3 september 2011. (from CD-ROM).

[RBA-12] : R. Ben Ayed, S. Brisset, « Multidisciplinary optimization formulations benefits on space mapping techniques », The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering (COMPEL), vol. 31, no. 3, pp. 945-957, 2012.

[RBA-12a] : R. Ben Ayed, J. Gong, S. Briset, 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, February 2012.

[RHO]: valable en ligne : http://www.ellsworth.se/UserFiles/file/KATALOGER/BLUESTAR/oils47_GB_2008.pdf (consulté le 02/05/2009).

[ROS-10] : M. Rossi, G. Parent, M. Hecquet, V. Lanfranchi, M. Bekemans, "Thermal modeling of industrial inductors and transformers associated to the converters", in proceedings of International Conference on Electrical Machines, Rome,-Italy, 1-3 September 2010.

[RYD-93] : S.O. Ryding, B. Steen, A. Wenblad, R. Karlson, « the EPS system- a life cycle assessment approach for cleaner technology and product developpement strategies, and design for the environment », paper presented at the EPA Workshop on Identiying a Framework for Humain Health and Environmental Risk Ranking, Washington DC, June 30- July 1, 1993.

[RYD-02] : S.A. Ryder, « A simple method for calculating winding temperature gradient in power transformers », IEEE transactions on power delivery, vol. 17, no. 4, pp.977-982, October 2002.

[SAM] : SAMTECH: http://caesam.com/fr/pss.php?ID=3&W=products.

[SAR-08] : SARGOS F. (SEMIKRON International), IGBT Power Electronics Teaching System –Principle for sizing power converters, Application Note AN-8005, septembre 2008, http://www.semikron.com/skcompub/en/AN-8005_Techning_System.pdf (dernière consultation le 09/04/2011).

[SEG-94] : G. Seguier, Francis Notelet, "Electrotechnique industrielle", Editions TEC&DOC, 1994.

[SHO-07] : T. Shozo, Y. Umeda, "Advances in life cycle engineering for sustainable manufacturing businesses", Edition Springer, 2007

[SOU-08] : F. Sourd and O. Spanjaard, « A multi-objective branch-and-bound framework. Application to the bi-objective spanning tree problem », INFORMS Journal of Computing, vol 20, no 3, pp. 472–484, 2008.

[SRI-94] : N. Srinivas and K. Deb, « Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetics algorithms », Evolutionary Computation Journal, vol 2, no 3, pp. 221–248, 1994.

[STA-09] : J. Staum, "Better simulation metamodeling: the why, what, and how of stochastic kriging", proceedings of the 2009 winter simulation conference, Austin, Texas, 13-16 December 2009.

[STE-91] : B.S. Stewart and C.C. White, « Multiobjective A* ». Journal of the ACM, vol 38, no 4, pp. 775-814, 1991.

[STE-95] : B. Steen, CPM report, "A systematic approach to environmental priority strategies in product developpement (EPS). Version 2000-Models and data of the default method", Chalmers University of Technology, Environmental Systems Analysis, 1999:5.

[STE-96] : B. Steen, « EPS-Default Valuation of environmental Impacts from Emission and Use of Resources », Version 1996, Swedicsh Environmental Protection Agency, AFR Report 111: http://gso.gbv.de/DB=2.1/CMD?ACT=SRCHA&SRT=YOP&IKT=1016&TRM=ppn+219563829&sourceid=fbw_bibsonomy (consulté le 24/02/2012).

[SWI-01a] : G. Swift, T.S. Molinski, W. Lehn, « A fundamental approach to transformer thermal modeling Part I : Theory and equivalent circuit », IEEE transaction on power delivery, vol. 16, no. 2, pp. 171-175, April 2001.

[SWI-01b] : G. Swift, T.S. Molinski, W. Lehn. « A fundamental approach to transformer thermal modeling Part II : field verification. », IEEE transaction on power delivery, vol. 16, no. 2, pp. 176-180, April 2001.

[TEC-01] : Encyclopédie techno-science. Efficacité énergétique. Valable en ligne. http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=3373. (Consulté le 24/07/2010)

[TED-06]: N.P. Tedford and J. Martins. "On the common structure of MDO problems: a comparison of architectures", in proceedings of the 11 th AIAA/ISSMO multidisciplinary analysis and Optimization conference, Portsmouth, VA, September 2006.

[TI-G6010] : B. Butel-Bellini, M. Janin, « Ecoconception : état de l'art des outils disponibles », Techniques de l'Ingénieur, ID document G6010, 10 octobre 1999.

[TIE-AM] : TechnoSoft: http://www.technosoft.com/contact.php.

[TRAN] : T.V. Tran, safety isolating transformer , online available at : http://l2ep.univ-lille1.fr/come/benchmark-transformer_fichiers/Design_transformer.pdf

[TRA-07] : T.V. Tran, S. Brisset, and P. Brochet, «A benchmark for multi-objective, multilevel, and combinatorial optimizations of a safety isolating transformer », proceedings of Compumag : 16th international conference on computation of electromagnetic fields, september, 2007, Prague, Czech.

[TRA-09] : T.V. Tran, « Problèmes combinatoires et modèles multi-niveaux pour la conception optimale des machines électriques », thèse de doctorat soutenue à l'Ecole Centrale de Lille le 18 juin 2009.

[TRA-10] : Tran, T.V., Moussouni, F., Brisset, S., and Brochet, P., "Adapted output space mapping technique for a bi-objective optimization". IEEE transactions on Magnetics, vol. 46, no. 8, pp. 2990-2993, August 2010.

[TUD-11] : T. Tudorache, R. Ben Ayed, S. Brisset, M. Popescu, « Cogging torque reduction of PMSM Using Optimization Algorithms», in proceedings of ISEF 2011, Madeira, Portugal, September, 2011 (from CD-ROM).

[UIC-345] : Union International des Chemins de Fer, UIC CODE 345 R, «Environmental specifications for new rolling stock », 1ère edition, juin 2006.

[ULU-95] : E.L. Ulungu and J. Teghem, « The two phases method : An efficient procedure to solve bi-objective combinatorial optimization problems », Foundation of computing and decision science, vol. 20, n° 2, pp. 149-165, 1995.

[VIS-DO] : Mathworks, Valable en ligne : http://www.mathworks.fr/products/coctions/product_detail/product_50525.html. (Consulté le 08/07/2011).

[WIL-08] : A.Wilk, J. Nieznanski, I. Moson, P. Dobrowolski, G. Kostro. "Nonlinear equivalent circuit model of a traction transformer for winding internal fault diagnostic purposes », Proceedings of the International Conference on Electriacl Machines, Vilamoura, Portugal, 6-9 September 2008, (from CD-ROM).

[WIK-01] : Wikipédia. Développement durable. Valable en ligne : http://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9veloppement_durable. (Consulté le 24/07/2010).

[ZIT-99] : E. Zitzler and L. Thiele, "Multiobjective evolutionary algorithms : A comparative case study and the strenth pareto approach", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol 3, no 4, pp. 257–271, 1999.

Eco-conception d'une chaine de traction ferroviaire

Résumé : Avec l'apparition des différentes normes et règlementations telles que les normes ISO 14001, les préoccupations industrielles y compris ferroviaires sont de plus en plus orientés vers l'éco-conception. La problématique la plus importante dans l'éco-conception des produits ferroviaires est de réduire leurs impacts environnementaux tout en maintenant leurs performances fonctionnelles et en maitrisant le coût. La solution pour surmonter ce problème est de trouver un ensemble de compromis entre les deux objectifs (impacts et coût).

L'éco-conception des produits ferroviaires présentent plusieurs difficultés parce que, d'une part, leur analyse de cycle de vie est très lourde. D'autre part, l'intégration de leurs impacts dans la phase de conception est délicate vu leur nombre. Enfin, ces composants ont parfois différents types de modèles à exploiter car ils présentent des compromis entre la précision et le temps de calcul.

Pour surmonter ces problèmes nous avons présenté dans cette thèse une méthode qui consiste premièrement, à alléger l'ACV à l'aide d'un logiciel de gestion environnementale et d'en profiter pour construire un modèle malléable pour calculer les différents impacts. Deuxièmement, à agréger ces impacts pour obtenir un seul indice qui sera considéré comme notre critère environnemental. Pour exploiter les outils d'optimisation, le problème d'éco-conception est traduit par un problème d'optimisation. Les algorithmes d'optimisation sont capables de trouver l'ensemble de compromis optimaux entre le critère environnemental et la masse (coût) sous forme d'un graphe appelé front de Pareto. Certains algorithmes ont été adaptés pour mieux servir dans l'éco-conception.

Mots clés : éco-conception, Analyse de cycle de vie, impact environnementaux, chaine de traction ferroviaire, efficacité énergétique, optimisation.

Eco-design of a railway traction chain

Abstract : With the introduction of different environmental standards like ISO 14001, concerns of manufacturers in railway industry are more and more oriented to the design of green products. One important issue when designing such products is the control of the cost impact and the evaluation of the price which consumers agree to pay for a reduced environmental footprint.

Eco-design of railway train presents several challenges for the designer. The first one is the complexity of the life cycle analysis of such components. The second challenge is the necessity of consideration of several environmental impacts in design stage given the number of impacts. Finally, railway components have different models with different granularity which can be used in the process of eco-design.

To overcome these problems we propose in this work a method which involves two steps. The first one is to simplify the LCA of the railway train using environmental management software and take the opportunity to build a malleable model to calculate eleven impacts. The second step, is to aggregate these impacts for a single indicator which is considered later as environmental criterion in the eco-design process. In order to investigate optimization tools, the eco-design problem is expressed into an optimization problem. Optimization algorithms are able to solve this problem and to find the optimal set of compromises between environmental criterion and the cost of the railway product. The set of compromises is given as a graph called the Pareto front. In our work the cost is expressed by the mass of the component and some optimization algorithms have been adapted in this work to serve in the process of eco-design.

Keywords : Eco-design, Life cycle assessment , environmental impacts, railway traction chain, energy efficiency, optimization