



HAL
open science

Contributions méthodologiques à l'éco-conception des convertisseurs électromagnétiques d'énergie

Vincent Debusschere

► **To cite this version:**

Vincent Debusschere. Contributions méthodologiques à l'éco-conception des convertisseurs électromagnétiques d'énergie. Energie électrique. École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2009. Français. NNT: . tel-00443702v3

HAL Id: tel-00443702

<https://theses.hal.science/tel-00443702v3>

Submitted on 17 Mar 2010

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.

THÈSE DE DOCTORAT
DE L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE CACHAN

présentée par

Vincent Debusschere

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE CACHAN

Spécialité : Electronique - Electrotechnique - Automatique

Contributions méthodologiques à l'éco-conception des convertisseurs électromagnétiques d'énergie

Soutenue le 09 Décembre 2009

Jury

Guy Friedrich,	Président du Jury
Stéphane Brisset,	Rapporteur
Christophe Espanet,	Rapporteur
Marie-Dominique de Cayeux,	Examinatrice
Pierre-Emmanuel Cavarec,	Examinateur
Bernard Multon,	Directeur de thèse
Hamid Ben Ahmed,	Co-directeur de thèse

THÈSE DE DOCTORAT
DE L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE CACHAN

présentée par

Vincent Debusschere

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE CACHAN

Spécialité : Electronique - Electrotechnique - Automatique

Contributions méthodologiques à l'éco-conception des convertisseurs électromagnétiques d'énergie

Soutenue le 09 Décembre 2009

Jury

Guy Friedrich,	Président du Jury
Stéphane Brisset,	Rapporteur
Christophe Espanet,	Rapporteur
Marie-Dominique de Cayeux,	Examinatrice
Pierre-Emmanuel Cavarec,	Examinateur
Bernard Multon,	Directeur de thèse
Hamid Ben Ahmed,	Co-directeur de thèse

Résumé

Dans un contexte de raréfaction des ressources et de limitation des capacités d'adaptation de l'environnement, la minimisation des impacts environnementaux de l'activité humaine représente un des objectifs majeurs du développement durable. Proposer des dispositifs présentant de meilleures performances environnementales nécessite une démarche de conception spécifique intégrant des critères environnementaux crédibles. Il s'agit en effet d'agir dès la conception d'un produit (ou d'un service) afin de bénéficier du maximum de latitude pour minimiser ses impacts environnementaux. Cette démarche se nomme l'éco-conception.

Rejoignant cette thématique, ces travaux ciblent des applications du domaine du Génie Electrique et plus particulièrement celui des convertisseurs électromagnétiques d'énergie. Ces composants présentent la particularité d'être fondamentalement, à l'usage, consommateurs d'énergie. Cet aspect implique un fort couplage entre le mode de fonctionnement du dispositif et son dimensionnement sur son cycle de vie.

Ce travail de thèse aborde dans une première partie l'analyse sur cycle de vie ainsi que les principes fondamentaux de la démarche d'éco-conception. Les perspectives méthodologiques que ces considérations ouvrent dans le domaine plus spécifique du Génie Electrique sont ensuite décrites.

Dans une seconde partie, trois cas d'étude en Génie Electrique de complexité croissante, font l'objet d'applications des principes d'éco-conception : un transformateur monophasé simplifié à alimentation fixe, une machine asynchrone monophasée à condensateur permanent réelle (produit commercial) et présentant des durées de fonctionnement très brèves, et enfin une machine asynchrone triphasée alimentée à fréquence variable. Les critères environnementaux retenus pour les optimisations sont l'énergie globale sur cycle de vie et les émissions de gaz à effet de serre. En effet, la prise en compte d'autres impacts environnementaux est identique du point de vue méthodologique.

Lors de ces études, nous montrons qu'il est intéressant d'optimiser la conception de ces convertisseurs électromagnétiques sur cycle de vie, lorsque leur durée cumulée de fonctionnement est faible devant leur durée d'usage. Le niveau de puissance de fonctionnement des convertisseurs est aussi un paramètre ayant une action significative sur les résultats d'éco-conception. Le paramétrage des trois cas d'études fait par ailleurs l'objet de différentes analyses de sensibilité permettant de cerner plus précisément, sur les résultats d'optimisation, l'influence des coûts énergétiques élémentaires, des choix des matériaux constituant le dispositif, etc. Enfin, pour les convertisseurs d'énergie, nous introduisons la notion de rendement énergétique sur cycle de vie prenant en compte leur efficacité globale.

Mots Clefs - Eco-conception, analyse sur cycle de vie, énergie globale sur cycle de vie, potentiel de réchauffement climatique, rendement sur cycle de vie, transformateur monophasé, machine asynchrone monophasée à condensateur permanent, machine asynchrone triphasée à fréquence variable, optimisation, algorithme évolutionnaire.

Abstract

Minimizing environmental impacts of human activity represent a major objective of sustainable development considering resources depletion and the limited capabilities of the environment to adapt. Devices with better environmental performance require a specific design approach integrating credible environmental criteria. It is indeed by acting at the early phase of design that it is likely to provide the maximum flexibility to minimize environmental impacts of a product (or service). This method is called eco-design.

In the field of eco-design, these works are conducted on applications of electrical engineering and more specifically of electromagnetic energy converters. These components have the distinction of consuming energy during use. This particularity implies a strong connection between the operating mode of the device and its life cycle design.

This thesis proposes in a first part an introduction to life cycle assessment and to the basic principles of eco-design. The methodological perspectives that these considerations open in the specific field of Electrical Engineering are then described.

In a second part, three Electrical Engineering cases of increasing complexity are studied : a simplified single-phase transformer, a permanent capacitor single-phase induction machine with very short operating times (real commercial product) and finally a three-phase induction machine with optimized power supply. These applications are used to emphasize the principles of eco-design and are optimized regarding three environmental criteria : the gross energy requirement, the resources depletion and the global warming potential. In fact, taking into account other environmental impacts is identical in terms of methodology.

In these studies, we show that it is interesting to optimize the design of these electromagnetic converters on life cycle, when their cumulative operating time is small compared to the total time of use. The amount of operating losses is also a parameter having a significant action on the results of eco-design. The setting of these applications is also subject to various sensitivity studies in order to determine more precisely the influence of the elementary energy costs, the choice of raw materials, etc.. Finally, we introduce the definition of an energy efficiency on life cycle more appropriate to an eco-design methodology.

Keywords - Eco-design, life cycle assessment, gross energy requirement, global warming potential, on life cycle efficiency, single-phase transformer, permanent capacitor single-phase induction machine, three-phase induction machine, power supply optimization, optimization, evolutionary algorithm.

Avant-propos

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Laboratoire Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Energie de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan. Il a pris place sur le site breton de l'équipe Systèmes d'Energies pour les Transports et l'Environnement sous la direction, en co-encadrement, de Bernard Multon et Hamid Ben Ahmed.

Ainsi j'exprime de sincères remerciements à mes deux encadrants de thèse, instigateurs de ces travaux, pour l'aide compétente qu'il m'ont apportée, pour la réactivité dont ils ont fait preuve en toutes circonstances ainsi que l'autonomie dont j'ai bénéficié par ailleurs dans mon travail de recherche.

Je tiens également à remercier messieurs Brisset et Espanet pour avoir accepté de rapporter cette thèse. Il en est de même pour les autres membres du jury, madame de Cayeux et messieurs Friedrich et Cavarec qui ont accepté de juger ce travail.

J'adresse de plus un remerciement particulier à Pierre-Emmanuel Cavarec, sans lequel la partie la plus intéressante de ce travail n'aurait pu avoir lieu, au travers de la collaboration avec la société SOMFY.

Je souhaite de plus remercier l'ensemble de l'antenne de Bretagne et plus particulièrement la partie recherche pour l'ambiance qu'ils y font régner chaque jour, ainsi que pour l'amitié qu'il ont pu m'accorder.

Je remercie ma famille pour le soutien et la confiance qu'ils m'ont toujours accordés.

Enfin je remercie mes amis, qui m'ont accompagnés pendant ces années.

Sommaire

Liste des symboles	xi
Introduction générale	3
Structure du mémoire	4
I Partie I - Conception et Environnement	7
1 Chapitre 1 - De l'analyse sur cycle de vie à l'éco-conception	9
Introduction	9
1 La démarche d'analyse sur cycle de vie	12
1.1 Le cycle de vie d'un système	12
1.2 Bref historique	14
1.3 Le cadre des normes	16
1.4 Méthodologie d'analyse sur cycle de vie	19
1.5 Deux impacts environnementaux spécifiques	21
2 L'éco-conception	27
2.1 De l'analyse sur cycle de vie à l'éco-conception	27
2.2 Critères environnementaux dans la conception	28
2.3 Démarches d'éco-conception	37
Conclusion	44
2 Chapitre 2 - Considérations sur l'éco-conception dans le Génie Electrique	47
Introduction	47
1 Diversités d'applications	48
2 Moteurs à haut rendements	50

3	Production	52
4	Recyclage	52
	4.1 Les matériaux	52
	4.2 Les composants du Génie Electrique	53
5	Phase de fonctionnement	55
	5.1 Durée de vie	55
	5.2 Cycle de fonctionnement	56
	5.3 Vitesse variable	57
6	Vieillessement	57
	6.1 Vieillessement thermique	58
	6.2 Vieillessement mécanique	59
7	Introduction aux chapitres à venir	60
	7.1 Objets d'études	61
	7.2 Définition du champ d'étude	62
	7.3 Modélisations et simulations	64
	Conclusion	67
 II Partie II - Application à des composants du Génie Electrique		69
<hr/>		
3	Chapitre 3 - Transformateur monophasé à alimentation fixe	71
	Introduction	71
1	Modélisation du transformateur	72
	1.1 Mise en place de l'étude	72
	1.2 Calcul de masse	74
	1.3 Modélisation électrique du transformateur	74
	1.4 Modélisation thermique du transformateur	76
2	Mise en place des simulations	80
	2.1 Considérations préalables	80
	2.2 Paramètres et contraintes d'optimisation	81
	2.3 Synoptique d'optimisation	82
3	Optimisation du transformateur monophasé	82
	3.1 Impact du cycle de vie sur le dimensionnement	84
	3.2 Robustesse des résultats d'optimisation	95
	3.3 Vieillessement du transformateur	100
	Conclusion	103
4	Chapitre 4 - Moteur asynchrone monophasé à fonctionnements brefs	107
	Introduction	107
1	Modélisation du moteur	108
	1.1 Description du moteur	108
	1.2 Restrictions de l'étude	110
	1.3 Calcul de masse	110
	1.4 Modélisation électrique	111

1.5	Mise en place du modèle	114
1.6	Modélisation thermique	121
2	Mise en place des calculs	122
2.1	Analyse sur cycle de vie	122
2.2	Vieillessement	123
2.3	Cycle de fonctionnement	124
2.4	Optimisations	125
3	Optimisation des dimensions du moteur	128
3.1	Configuration initiale	128
3.2	Sensibilité de la machine à la tension d'alimentation	132
3.3	Sensibilité à l'usage de l'actionneur	133
3.4	Sensibilité aux paramètres environnementaux	136
3.5	Sensibilité aux choix des matériaux	139
3.6	Sensibilité aux dimensions radiales	140
	Conclusion	141
5	Chapitre 5 - Machine asynchrone triphasée à fréquence variable	145
	Introduction	145
1	Modélisation de la machine	146
1.1	Mise en place de l'étude	146
1.2	Calcul de masse	148
1.3	Modélisation électrique de la machine	149
1.4	Modélisation thermique de la machine asynchrone	154
2	Mise en place des simulations	156
2.1	Considérations préalables	156
2.2	Paramètres et contraintes d'optimisation	156
2.3	Optimisation de l'alimentation	159
3	Optimisation des dimensions de la machine	163
3.1	Résultats d'optimisation	163
3.2	Action sur le nombre de paires de pôles	169
3.3	Analyses de sensibilité des résultats d'optimisation	177
	Conclusion	187
	Conclusion générale	191
	Perspectives	193
	Annexes	197
A	Annexe A - Base de données d'inventaire d'analyse sur cycle de vie	197
B	Annexe B - Démarche d'analyse sur cycle de vie	201

1	Définition des objectifs de l'analyse sur cycle de vie	201
1.1	Problématique	201
1.2	L'unité fonctionnelle	202
1.3	Les limites du système analysé : le champ d'étude	204
2	Réalisation de l'inventaire	205
2.1	Une démarche exhaustive	205
2.2	Bases de données d'inventaires de cycle de vie	208
2.3	Qualité des données de l'inventaire	209
2.4	Co-produits et affectation	213
3	Analyse des impacts environnementaux	213
3.1	Différentes catégories d'impact	215
3.2	Caractérisation des impacts de l'inventaire	216
3.3	Exemple de méthodes d'analyse des impacts environnementaux	218
4	Interprétation des résultats	220
C Annexe C - Données de calcul		223
D Annexe D - Modélisation linéaire de la machine asynchrone monophasée à condensateur permanent		225
1	Principaux calculs	225
1.1	Schéma équivalent monophasé	225
1.2	Calcul du couple	231
2	Calculs annexes	233
2.1	Coefficients de bobinage	233
2.2	Rapport de transformation stator-rotor	234
E Annexe E - Modélisation mécanique des parties inactives de la machine asynchrone triphasée		235
1	Masse des parties inactives	235
1.1	Carter	236
1.2	Roulements	237
1.3	Masses	238
2	Dimensionnement de l'arbre	239
F Annexe F - Modélisation électrique de la machine asynchrone triphasée		241
1	Eléments du schéma électrique	241
1.1	Résistance spécifique du bobinage	241
1.2	Perméance de fuites statorique	242
1.3	Perméance magnétisante	242
1.4	Résistance spécifique équivalente aux pertes fer	242
1.5	Résistance spécifique rotorique ramenée au stator	243
1.6	Perméance de fuites rotoriques ramenées au stator	244
2	Calculs annexes	245
2.1	Coefficient de bobinage	245
2.2	Rapport de transformation par spire stator - rotor	246

2.3	Entrefer équivalent de Carter	246
2.4	Effet de peau	246
G	Annexe G : Modélisation thermique de la machine asynchrone triphasée	251
1	Conduction radiale dans la culasse statorique	251
2	Conduction à l'interface entre la culasse et le carter	251
3	Conduction radiale dans les dents statoriques	252
4	Conduction entre le bobinage et les encoches statoriques	253
5	Conduction au sein du bobinage statorique	253
6	Conduction entre les têtes de bobines et le carter	255
7	Conduction radiale dans le circuit magnétique rotorique	255
8	Conduction entre la cage et le circuit magnétique rotorique	255
9	Conduction entre la culasse rotorique et l'arbre	255
10	Conduction dans les roulements	256
11	Conduction entre l'arbre et les roulements	257
12	Conduction entre les roulements et les flasques	257
13	Conduction axiale dans l'arbre	257
14	Conduction entre les flasques et le carter	257
15	Transferts thermiques dans l'entrefer	258
15.1	Pertes dues au cisaillement de l'air dans l'entrefer	258
15.2	Convection entre le stator et le rotor	260
16	Convection entre le carter et l'air ambiant	264
17	Convection entre l'air interne et les flasques	265
18	Convection entre les têtes de bobines et l'air intérieur	266
	Bibliographie	267

Liste des symboles

Divers

A_1	Constante
A_2	Constante
\mathcal{F}	Fonction de dimension
\mathcal{F}_{11}	Élément de fonction de transfert
\mathcal{F}_{12}	Élément de fonction de transfert
\mathcal{F}_{21}	Élément de fonction de transfert
\mathcal{F}_{22}	Élément de fonction de transfert
\mathcal{F}_d	Élément de fonction de transfert
s	Variable de Laplace

Dimensions

α_{es}	Ouverture d'encoche statorique, rad
D_{acc}	Diamètre moyen des anneaux de court-circuit, m
D_{cs}	Diamètre moyen de culasse statorique, m
D_e	Diamètre moyen d'entrefer, m
D_{er}	Diamètre extérieur rotorique, m
D_{es}	Diamètre extérieur statorique, m
D_{fr}	Diamètre de fond d'encoche rotorique, m
D_{fs}	Diamètre de fond d'encoche statorique, m

D_{ir}	Diamètre intérieur rotorique, m
D_{is}	Diamètre intérieur statorique, m
D_r	Diamètre extérieur des roulements, m
d_r	Pas d'encoche rotorique, m
d_s	Pas d'encoche statorique, m
dS	Élément de surface, m ²
D_{tb}	Diamètre moyen des têtes de bobine, m
e_a	Épaisseur d'arbre côté charge, m
e_{av}	Épaisseur d'arbre côté ventilation, m
e_{ca}	Épaisseur du carter, m
e_{cr}	Épaisseur de la culasse rotorique, m
e_{cs}	Épaisseur de la culasse statorique, m
e_{dr}	Épaisseur de dent rotorique, m
e_{ds}	Épaisseur de dent statorique, m
e_{er}	Épaisseur moyenne d'encoche rotor, m
e_{es}	Épaisseur moyenne d'encoche stator, m
e_f	Épaisseur des flasques, m
e_i	Épaisseur d'isolant entre le bobinage et le circuit magnétique du transformateur, m
e_{ir}	Épaisseur des isthmes d'encoches rotoriques, m
e_{is}	Épaisseur des isthmes d'encoches statoriques, m
e_n	Épaisseur du noyau central du transformateur, m
ϵ	Largeur relative de l'espace annulaire entre rotor et stator
e_{pt}	Épaisseur du capot de ventilation, m
e_v	Épaisseur des ailettes du ventilateur, m
h_b	Hauteur de la fenêtre de bobinage du transformateur, m
h_e	Hauteur d'entrefer, m
h_{er}	Hauteur d'encoche rotorique, m
h_{es}	Hauteur d'encoche statorique, m
h_{ir}	Hauteur des isthmes d'encoches rotoriques, m
h_{is}	Hauteur des isthmes d'encoches statoriques, m
k_{fc}	Facteur de denture statorique
L_a	Longueur active du paquet de tôles, m

L_{b1}	Longueur moyenne d'une spire du bobinage primaire du transformateur, m	\hat{B}_{ds}	Niveau d'induction magnétique maximal dans les dents statoriques, T
L_{b2}	Longueur moyenne d'une spire du bobinage secondaire du transformateur, m	\hat{B}_e	Niveau d'induction magnétique maximal dans l'entrefer, T
L_r	Longueur moyenne d'un conducteur rotorique, m	C	Capacité du condensateur connecté en série avec la phase auxiliaire de la machine asynchrone monophasée, F
L_s	Longueur moyenne d'une spire du bobinage statorique, m	δ	Epaisseur de peau, m
m_s	Nombre d'encoches par pôle et par phase au stator	\vec{E}	Vecteur de champ électrique, V.m ⁻¹
R_{ir}	Rayon intérieur rotorique, m	e_s	Tension par spire aux bornes de la perméance magnétisante, V.tours ⁻¹
$S_{b,0}$	Surface d'échange entre le bobinage et l'air ambiant, m ²	η_{cv}	Rendement sur cycle de vie, %
S_{b1}	Section du bobinage primaire du transformateur, m ²	η_f	Rendement sur cycle de fonctionnement, %
S_{b2}	Section du bobinage secondaire du transformateur, m ²	f_r	Fréquence rotorique, Hz
$S_{b,cm}$	Surface d'échange entre le bobinage et le circuit magnétique, m ²	f_s	Fréquence statorique d'alimentation, Hz
S_{cm}	Surface du circuit magnétique, m ²	g	Glissement de la machine asynchrone
$S_{cm,0}$	Surface d'échange entre le circuit magnétique et l'air ambiant, m ²	\vec{H}	Vecteur de champ magnétique, A.m ⁻¹
S_{er}	Section d'encoche rotorique, m ²	I_1	Courant primaire du transformateur, A
S_{es}	Section d'encoche statorique, m ²	I_2	Courant secondaire du transformateur, A
S_n	Section transversale du noyau central du transformateur, m ²	I_a	Courant absorbé par la phase auxiliaire de la machine asynchrone monophasée, A
V_{ar}	Volume de l'arbre, m ³	I_p	Courant absorbé par la phase principale de la machine asynchrone monophasée, A
V_{ca}	Volume du carter, m ³	i_r	Ampères.tours rotoriques ramenés au stator, A.tours (ou A)
V_{pt}	Volume de la protection du ventilateur, m ³	i_s	Ampères.tours statoriques, A.tours (ou A)
V_v	Volume de la ventilation, m ³	I_t	Courant absorbé par la machine asynchrone monophasée, A

Electricité et électromagnétisme

\hat{B}	Maximum d'induction magnétique dans le circuit magnétique, T	k_{bs}	Coefficient de bobinage statorique
\vec{B}	Vecteur d'induction magnétique, T	k_c	Coefficient de Carter
\hat{B}_{cr}	Niveau d'induction magnétique maximal dans la culasse rotorique, T	k_{cr}	Coefficient de Carter rotorique
\hat{B}_{cs}	Niveau d'induction magnétique maximal dans la culasse statorique, T	k_{cs}	Coefficient de Carter statorique
\hat{B}_{dr}	Niveau d'induction magnétique maximal dans les dents rotoriques, T	k_{ir}	Coefficient d'inclinaison rotorique
		k_{lam}	Coefficient de foisonnement des tôles du circuit magnétique
		k_{pD}	Coefficient d'effet de peau sur la perméance de fuites rotoriques

k_{pr}	Coefficient d'effet de peau sur la résistance rotorique	r_{1b}	Résistance spécifique d'un conducteur rotorique, Ω .tours ⁻² (ou Ω)
k_r	Coefficient de remplissage	r_f	Résistance spécifique équivalente aux pertes fer, Ω .tours ⁻² (ou Ω)
\mathcal{L}	Inductance magnétisante saturée de la machine asynchrone monophasée, H	R_r	Résistance rotorique ramenée au stator de la machine asynchrone monophasée, Ω
l_f	Inductance correspondante de fuites de la machine asynchrone monophasée, H	r_r	Résistance spécifique de la cage rotorique ramenée au stator, Ω .tours ⁻² (ou Ω)
l_f'	Inductance correspondante de fuites de la modélisation par éléments finis de la machine asynchrone monophasée, H	R_r'	Résistance rotorique ramenée au stator de la modélisation par éléments finis de la machine asynchrone monophasée, Ω
\mathcal{L}'	Inductance magnétisante saturée de la modélisation par éléments finis de la machine asynchrone monophasée, H	R_s	Résistance du bobinage statorique, Ω
m	Rapport de transformation	r_s	Résistance spécifique du bobinage d'une phase statorique, Ω .tours ⁻² (ou Ω)
μ_0	Perméabilité magnétique du vide, H.m ⁻¹	R_s'	Résistance du bobinage statorique de la modélisation par éléments finis, Ω
N_1	Nombre de spires du bobinage primaire du transformateur	R_{tb}	Résistance des têtes de bobine, Ω
N_2	Nombre de spires du bobinage primaire du transformateur	σ_a	Conductivité électrique de l'aluminium, S.m ⁻¹
N_r	Nombre d'encoches au rotor	σ_c	Conductivité électrique du cuivre, S.m ⁻¹
N_s	Nombre d'encoches au stator	U_1	Tension primaire du transformateur, V
N_{sp}	nombre de spires par phase de la machine asynchrone monophasée	U_2	Tension secondaire du transformateur, V
N_{spr}	Nombre de spires par phase au rotor	V_p	Tension aux bornes de la phase principale de la machine asynchrone monophasée, V
N_{sps}	Nombre de spires par phase au stator	V_p'	Tension aux bornes de la phase principale de la machine asynchrone monophasée estimée par éléments finis, V
ω_r	Pulsation rotorique, rad.s ⁻¹	v_s	Tension par spire aux bornes d'une phase de la machine asynchrone, V.tours ⁻¹
ω_s	Pulsation d'alimentation, rad.s ⁻¹	\underline{z}_m	Impédances représentatives de la partie pertes fer et perméance magnétisante du schéma électrique équivalent monophasé par spires de la machine asynchrone triphasée, Ω
p	Nombre de paires de pôles	\underline{Z}_ϕ	Impédance liant I_p et $\underline{\phi}_p$ pour la machine asynchrone monophasée, H
\mathcal{P}_{1b}	Perméance équivalente aux flux de fuites d'un conducteur rotorique, H	\underline{Z}_ϕ'	Impédance liant $(N_{sp}i_p)$ et $\underline{\phi}_p'$ pour la modélisation par éléments finis de la machine asynchrone monophasée, H
$\hat{\phi}_e$	Flux maximum embrassé par une spire d'une phase, Wb	$\underline{Z}_{\phi s}$	Impédance représentative des effets 3D non pris en compte dans la modélisation par éléments finis 2D, Ω
$\underline{\phi}_p$	Flux embrassé par une phase de la machine asynchrone monophasée, Wb	\underline{z}_r	Impédances représentatives de la partie rotorique du schéma électrique équivalent monophasé par spires de la machine asynchrone triphasée, Ω
$\underline{\phi}_p'$	Flux embrassé par une phase de la modélisation par éléments finis de la machine asynchrone monophasée, Wb		
\mathcal{P}_μ	Perméance magnétisante, H		
\mathcal{P}_r	Perméance équivalente aux flux de fuites rotoriques ramenée au stator, H		
\mathcal{P}_s	Perméance équivalente aux flux de fuites statoriques, H		

\underline{z}_s Impédances représentatives de la partie statorique du schéma électrique équivalent monophasé par spires de la machine asynchrone triphasée, Ω

Mécanique

\hat{C} Couple maximal, N.m
 C_0 Charge dynamique de référence d'un roulement, N
 C_e Couple électromagnétique, N.m
 C^* Couple de consigne, N.m
 dF Force élémentaire, N
 \bar{F} Charge moyenne dynamique d'un roulement, N
 F Force, N
 M_{ac} Masse des parties actives, kg
 M_{ar} Masse de l'arbre, kg
 M_b Masse du bobinage, kg
 M_c Masse de la cage, kg
 M_{ca} Masse du carter, kg
 M_{cm} Masse du circuit magnétique, kg
 M_m Masse d'un matériau, kg
 M_{nac} Masse des parties inactives, kg
 M_p Masse des pieds de la machine, kg
 M_{pt} Masse du capot de ventilation, kg
 M_r Masse des roulements, kg
 $|\hat{M}_t|$ Moment de torsion maximal, N.m
 M_{tot} Masse totale, kg
 M_v Masse du ventilation, kg
 \bar{N} Vitesse de rotation moyenne d'un roulement, tours.min⁻¹
 N_c Nombre de cycle de montée et descente du volet roulant
 ν Vitesse tangentielle du rotor, m.s⁻¹
 Ω vitesse angulaire mécanique du rotor, rad.s⁻¹
 Ω^* Consigne de Vitesse, rad.s⁻¹
 ρ_0 Masse volumique de l'air, kg.m⁻³
 ρ_{ac} Masse volumique de l'acier, kg.m⁻³

ρ_{al} Masse volumique de l'aluminium, kg.m⁻³
 ρ_c Masse volumique du cuivre, kg.m⁻³
 ρ_{fe} Masse volumique du fer, kg.m⁻³
 ρ_{fo} Masse volumique de la fonte, kg.m⁻³
 σ_e Limite élastique à l'extension, Pa
 $|\hat{\tau}|$ Contrainte de torsion maximale, N.m

Energie

E_{acv} Energie globale sur cycle de vie, kWh
 E_{fct} Energie des pertes de fonctionnement, kWh
 E_{mat} Energie globale sur cycle de vie hors pertes de fonctionnement, kWh
 $E_{p,m}^m$ Energie élémentaire massique pour une phase de cycle de vie et un matériau donné, kWh.kg⁻¹
 E_{ut} Energie utile, kWh
 P_2 Puissance absorbée par la charge raccordée au secondaire du transformateur, W
 P_e Puissance dissipée par le cisaillement de l'air dans l'entrefer, rad.s⁻¹
 P_{cF} Pertes par courants de Foucault, W
 P_{cF}^v Pertes par courants de Foucault volumiques, W.m⁻³
 P_f Pertes fer, W
 P_{fct} Pertes de fonctionnement, W
 P_H Pertes par hystérésis, W
 P_H^v Pertes par hystérésis volumiques, W.m⁻³
 P_J Pertes par effet Joule, W
 P_u Puissance utile, W

Physique générale

C_d Coefficient de friction de pelliculaire
 k_{cF} Coefficient des pertes par courants de Foucault, A.m.V⁻¹
 k_H Coefficient des pertes par hystérésis, A.m.V⁻¹.s⁻¹
 μ Viscosité dynamique de l'air, N.m⁻².s⁻¹
 N_u Nombre de Nusselt
 N_{ur} Nombre de Nusselt rotorique en convection forcée dans l'entrefer

N_{us}	Nombre de Nusselt statorique en convection forcée dans l'entrefer	$h_{s,iF}$	Coefficient d'échange thermique convectif forcé entre le stator et le fluide d'entrefer
P_r	Nombre de Prandtl	$k_{r,i}$	Facteur d'échauffement adiabatique rotorique dans l'entrefer
R_e	Nombre de Reynolds	$k_{s,i}$	Facteur d'échauffement adiabatique statorique dans l'entrefer
R_{ef}	Nombre de Reynolds associé au mouvement axial du fluide dans un espace annulaire	λ_0	Conductivité thermique de l'air, $W.K^{-1}.m^{-1}$
R_{er}	Nombre de Reynolds associé à la rotation d'une surface dans un espace annulaire	λ_b	Conductivité thermique radiale équivalente du bobinage, $W.K^{-1}.m^{-1}$
t_{eq}	Durée d'utilisation par jour, s	$\lambda_{b,cs}^s$	Conductance thermique surfacique équivalente au contact entre le bobinage et le circuit magnétique à travers l'isolant de fond d'encoche, $W.K^{-1}.m^{-2}$
τ_i	Espérance de vie de l'isolant, s	$\lambda_{cs,c}^s$	Conductance thermique surfacique équivalente au contact entre la culasse statorique et le carter, $W.K^{-1}.m^{-2}$
τ_i'	Durée de vie moyenne de l'isolant, s	λ_f	Conductivité thermique du fer, $W.K^{-1}.m^{-1}$
τ_{ref}	Durée de vie de référence de l'isolant dans les conditions de fonctionnement de référence, s	$\lambda_{f,c}^s$	Conductance thermique surfacique équivalente au contact entre les flasques et le carter, $W.K^{-1}.m^{-2}$
τ_r	Durée de vie nominale d'un roulement, s	λ_i	Conductivité thermique de l'isolant entre le bobinage et le circuit magnétique du transformateur, $W.K^{-1}.m^{-1}$

Thermique

C_0^m	Capacité thermique massique de l'air, $J.K^{-1}.kg^{-1}$	$\lambda_{r,a}^s$	Conductance thermique surfacique équivalente au contact entre le circuit magnétique rotorique et l'arbre, $W.K^{-1}.m^{-2}$
C_b	Capacité thermique du bobinage, $J.K^{-1}$	$\lambda_{r,f}^s$	Conductance thermique surfacique équivalente au contact entre les roulements et les flasques, $W.K^{-1}.m^{-2}$
C_{cm}	Capacité thermique du circuit magnétique, $J.K^{-1}$	\mathcal{R}_a	Résistance thermique de conduction axiale dans l'arbre, $K.W^{-1}$
$\Delta\theta_{b,0}$	Différence de température entre le bobinage et l'air ambiant, °C (ou K)	\mathcal{R}_b	Résistance thermique de convection entre le bobinage statorique et les encoches statoriques, $K.W^{-1}$
$\Delta\theta_{c,0}$	Différence de température entre le carter et l'air ambiant, °C (ou K)	$\mathcal{R}_{b,0}$	Résistance thermique de convection entre le bobinage et l'air ambiant, $K.W^{-1}$
$\Delta\theta_{cm,0}$	Différence de température entre le circuit magnétique et l'air ambiant, °C (ou K)	$\mathcal{R}_{b,c}$	Résistance thermique de convection entre les têtes de bobines et le carter, $K.W^{-1}$
$\Delta\theta_{f,0}$	Différence de température entre les flasques et l'air ambiant, °C (ou K)	$\mathcal{R}_{b,cm}$	Résistance thermique de conduction entre le bobinage et le circuit magnétique à travers un isolant électrique, $K.W^{-1}$
$\Delta\theta_{r,0}$	Différence de température entre le rotor et l'air ambiant, °C (ou K)	$\mathcal{R}_{b,cs}$	Résistance thermique de convection entre le bobinage et le circuit magnétique statorique, $K.W^{-1}$
F_g	Facteur thermique correctif lorsque la largeur relative de l'espace annulaire entre rotor et stator est faible		
h	Coefficient de convection et de rayonnement associé aux échanges thermiques avec l'air ambiant, $W.m^{-2}.K^{-1}$		
h_i	Coefficient d'échange thermique convectif naturel dans l'entrefer		
$h_{r,iF}$	Coefficient d'échange thermique convectif forcé entre le rotor et le fluide d'entrefer		

$\mathcal{R}_{b,i}$	Résistance thermique de convection entre les têtes de bobines et l'air intérieur, $K.W^{-1}$	\mathcal{R}_e	Résistance thermique de convection entre le stator et le rotor via l'entrefer, $K.W^{-1}$
$\mathcal{R}_{c,0}$	Résistance thermique de convection naturelle entre le carter et l'air ambiant, $K.W^{-1}$	$\mathcal{R}_{f,c}$	Résistance thermique de conduction entre le carter et les flasques, $K.W^{-1}$
$\mathcal{R}_{cm,0}$	Résistance thermique de convection entre le circuit magnétique et l'air ambiant, $K.W^{-1}$	$\mathcal{R}_{i,f}$	Résistance thermique de convection entre l'air interne et les flasques, $K.W^{-1}$
\mathcal{R}_{cr}	Résistance thermique de conduction radiale dans la culasse rotorique, $K.W^{-1}$	\mathcal{R}_r	Résistance thermique de conduction dans les roulements, $K.W^{-1}$
$\mathcal{R}_{cr,a}$	Résistance thermique de conduction entre le circuit magnétique rotorique et l'arbre, $K.W^{-1}$	$\mathcal{R}_{r,e}$	Résistance thermique de convection entre les dents rotoriques et l'air d'entrefer, $K.W^{-1}$
\mathcal{R}_{cs1}	Résistance thermique de conduction radiale dans la partie extérieure de la culasse statorique, $K.W^{-1}$	$\mathcal{R}_{r,f}$	Résistance thermique de conduction entre les roulements et les flasques, $K.W^{-1}$
\mathcal{R}_{cs2}	Résistance thermique de conduction radiale dans la partie intérieure de la culasse statorique, $K.W^{-1}$	$\mathcal{R}_{s,e}$	Résistance thermique de convection entre les dents statoriques et l'air d'entrefer, $K.W^{-1}$
$\mathcal{R}_{cs,c}$	Résistance thermique de conduction de l'interface entre le circuit magnétique statorique et le carter, $K.W^{-1}$	θ_0	Température de l'air ambiant, °C
\mathcal{R}_d	Résistance thermique de conduction radiale dans les dents statoriques, $K.W^{-1}$	θ_b	Température du bobinage, °C
		θ_{cm}	Température du circuit magnétique, °C
		θ_i	Température de l'isolant, °C
		θ_{ref}	Température de l'isolant dans les conditions de fonctionnement de référence, °C

Introduction générale

Les effets négatifs de l'impact de l'activité humaine sur son environnement, et donc sur son propre fonctionnement, ne sont maintenant plus remis en cause. La prise de conscience écologique du grand public, malgré des tentatives préventives apparues de longue date dans des domaines aussi variés que le journalisme, la politique ou la recherche, ne commence à être considérée comme un enjeu réel dans l'industrie que depuis quelques années. Cet intérêt est notamment suscité par des normes imposant de proposer des produits à moindre impact environnemental, établies dans l'optique d'une consommation consciente des ressources et des capacités d'adaptation limitées de notre environnement.

Toutefois, la notion de « respect de l'environnement » couvre des domaines très divers et est d'une manipulation complexe. Proposer des produits présentant de bonnes performances environnementales nécessite une démarche de conception spécifique intégrant des critères environnementaux crédibles. Il s'agit en effet d'agir dès la conception d'un produit (ou d'un service) afin de bénéficier du maximum de latitude pour minimiser ses impacts environnementaux. Cette démarche se nomme l'*éco-conception*. Les efforts à consentir dans ce cas ont des retombées qui ne sont constatées qu'à des échelles de temps et d'espace distinctes de celles de l'économie courante, rendant ces démarches strictement volontaristes. L'éco-conception est de plus soumise au comportement sociologique accompagnant l'usage du produit. Ainsi le principe du tout consommable, une des conséquences du développement des transports et de leur relativement faible coût, amplifie d'autant plus les impacts environnementaux des produits non éco-conçus.

Les études élargies au cycle de vie d'un produit (« du berceau à la tombe ») sont multi-disciplinaires. Les concepteurs sont effectivement confrontés à des mécanismes non courants, brassant des flux de matière et d'énergie à l'échelle de la vie entière du produit et cumulant des impacts environnementaux à l'échelle planétaire. Il est possible aujourd'hui de baser les travaux d'éco-conception sur des analyses sur cycle de vie dont les résultats sont regroupés dans des bases de données d'inventaires spécifiques. Cette simplification

significative de la démarche d'éco-conception se paie par une grande dépendance aux données d'inventaires d'analyse sur cycle de vie. De ce fait, les travaux effectués dans le domaine du développement durable sont fondamentaux afin de rallier les connaissances des différentes disciplines concernées par ces horizons de recherche. A titre indicatif, un extrait sélectif d'une base de données d'inventaires d'analyse sur cycle de vie Suisse (EcoInvent Centre, Swiss Centre for life cycle inventories) est présenté en Annexe A.

Rejoignant cette thématique de diminution de l'empreinte écologique des produits consommateurs d'énergie, nous ciblons nos études de conception selon des critères de moindres impacts environnementaux sur des applications du domaine du Génie Electrique et plus particulièrement celui des convertisseurs électromagnétiques d'énergie. L'éco-conception va ajouter une approche multi-étape et multicritères au procédé déjà multicritères des optimisations intervenant dans les conceptions classiques (y compris sur cycles de fonctionnement) des convertisseurs d'énergie. Ainsi, situés à l'intersection de la faisabilité technique, de la maîtrise des coûts, des impacts environnementaux et du service utile, les travaux d'éco-conception ouvrent la voie à de nouvelles problématiques scientifiques dans le domaine du Génie Electrique.

Structure du mémoire

Le mémoire de thèse est divisé en deux grandes parties. La première présente tout d'abord, au sein du *Chapitre 1* (et en Annexe B), les considérations générales sur la méthode d'analyse sur cycle de vie ainsi que les principes fondamentaux de la démarche d'éco-conception. Puis le *Chapitre 2* propose les perspectives méthodologiques que ces considérations ouvrent dans le domaine plus spécifique du Génie Electrique.

Les travaux présentés dans la suite du mémoire ne sont délibérément pas basés sur l'exploitation d'un logiciel d'analyse sur cycle de vie (commercial ou non). Ces logiciels peuvent en effet être considérés comme des outils d'aide à l'éco-conception, mais ils ne font qu'exploiter des bases de données, d'ailleurs insuffisantes, permettant difficilement de focaliser l'attention sur les méthodologies de conception spécifiques d'un domaine, en l'occurrence celui qui nous intéresse ici. De ce fait, nous utilisons seulement des extraits de bases de données d'inventaires d'analyses sur cycle de vie.

La seconde partie regroupe trois cas d'étude de conception selon des critères environnementaux sur cycle de vie. Il s'agit de travaux à visées méthodologiques et exploratoires. Afin de donner une vue complémentaire aux critères usuels de conception des machines électriques, comme la minimisation de la masse et des pertes de fonctionnement, nous élargissons ces critères à l'ensemble du cycle de vie des convertisseurs d'énergie. Compte tenu de la nature consommatrice d'énergie de ces dispositifs, nous considérons comme critère principal de conception la consommation globale d'énergie sur cycle de vie. La méthodologie d'éco-conception étant identique quel que soit l'impact environnemental, nous

considérons le potentiel de réchauffement climatique à titre d'impact environnemental supplémentaire uniquement sur le deuxième cas d'étude (machine asynchrone monophasée). Les données physiques utilisées dans les calculs des trois chapitres constituant cette deuxième partie sont regroupées en Annexe C.

Nous appliquons dans un premier temps les principes d'éco-conception à un « cas d'école », c'est-à-dire un transformateur monophasé simplifié, au sein du *Chapitre 3*. Ce chapitre permet de mettre en place les procédures d'optimisation sur un cas simple et d'identifier les mécanismes régissant la disposition des solutions optimales dans l'espace des objectifs. Ces mécanismes se retrouvent dans les chapitres suivants.

Les conclusions de ces premiers travaux, ainsi que l'opportunité d'une collaboration avec la société SOMFY, ont guidé notre étude vers une application industrielle présentant une bonne sensibilité aux critères environnementaux sous la forme d'une machine asynchrone monophasée pour entraînement de volet roulant, dont la minimisation de l'énergie globale sur cycle de vie ainsi que du potentiel de réchauffement climatique sont présentés au *Chapitre 4*. Bien que finalement non utilisée dans les optimisations, la modélisation linéaire de la machine asynchrone monophasée à condensateur permanent est présentée en Annexe D.

Le mémoire se termine par l'application des principes d'éco-conception à un modèle de machine asynchrone triphasée dont le paramétrage est plus large, incluant notamment ses paramètres d'alimentation, *Chapitre 5*. Les modélisations nécessaires à la mise en place des optimisations sont regroupées en annexe pour une meilleure lisibilité des résultats. Ainsi, concernant le modèle de machine asynchrone triphasée, les calculs mécaniques se retrouvent en Annexe E, les calculs électriques en Annexe F et les calculs thermiques en Annexe G. Ce dernier chapitre ouvre la voie à de nombreuses perspectives à ces travaux, qui sont discutées dans la conclusion générale.

Première partie

Conception et Environnement

Problématique de l'approche sur cycle de vie dans la conception

Introduction

Telle que nous la connaissons et la vivons depuis plus d'un siècle, la société occidentale s'impose surtout par une diversification ainsi qu'un accroissement systématiques de la production de biens de consommation (mythe de la croissance). Nous constatons aujourd'hui que pratiquement tout bien, produit comme service, est la marchandise d'une économie soumise à des objectifs de rentabilité financière. La conjonction de cette production et cette consommation effrénées, corrélée à une croissance forte de la population multiplie les impacts conséquents (et irréversibles ?) sur l'environnement. La responsabilité majeure dans la dégradation de notre environnement est désormais incontestablement attribuée à un mode de vie fondé sur le « toujours plus », hérité d'une époque où l'humanité n'atteignait pas des densités de populations telles que nous les connaissons aujourd'hui. Il faut dès lors consommer différemment, consommer « mieux » à défaut de consommer moins et enfin produire ces consommables de façon plus respectueuse d'un écosystème planétaire qui commence à présenter des modifications de son biotope radicalement nouvelles, pour ne pas dire inquiétantes, dans une histoire vieille pourtant de plusieurs millions d'années [GIE07].

« Nous sommes entrés dans le temps du Monde fini » [Jac93]. Partant du principe que la société de consommation actuelle évolue dans un écosystème aux ressources et aux capacités d'absorptions limitées, deux solutions émergent parmi d'autres lorsque son futur est envisagé. La première concerne l'action sur le comportement social au travers d'actions en faveur d'une baisse généralisée de la consommation. Il convient alors d'éviter la création de besoins nouveaux et de pousser à la préservation de produits de haute qualité, fonctionnels sur le long terme amenant ainsi une décroissance de la consommation sans diminution du niveau de vie des consommateurs [Gue07]. La seconde solution consiste à accepter la situation actuelle d'une consommation de produits qui ne sera pas ou très peu amoindrie. Il convient dès lors de se pencher sur l'amélioration de ces biens de consommation en faveur d'une minimisation de leur impacts environnementaux [VP01]. Ces deux comportements ne sont bien entendu pas contradictoires, nous avons même la conviction qu'ils doivent aller de pair dans un avenir conscient des enjeux écologiques planétaires.

L'apparition de pollutions locales comme les pluies acides [Roq88] ou globales comme l'effet de serre ou les trous dans la couche d'ozone [Meg89], la raréfaction des ressources énergétiques amenant différentes crises, comme les crises pétrolières [AIE07] le prix des matières premières en forte croissance [Moh09], ont engendré un engouement pour les technologies dites « propres », plus connues sous le qualificatif d'éco-technologies. L'emploi généralisé de termes au préfixe « éco », tout en laissant très floue leur définition, recouvre maintenant un nombre considérable de concepts dont la plupart ont toutefois comme point commun de se vouloir relativement conscient de l'environnement. Ces démarches reposent néanmoins sur de réels travaux scientifiques d'envergures concernant une approche systémique généralisée dont l'émergence ne date que d'une trentaine d'années et qui a pour nom l'*analyse sur cycle de vie*, souvent abrégée sous le sigle ACV (*Life Cycle Assessment* ou LCA en anglais) [JSC05].

L'intégration de l'environnement dans la conception d'un produit est une notion encore plus récente au niveau de la production effective d'objets de consommation. Les investissements nécessaires à l'intégration de critères environnementaux dans la conception de processus de production souvent bien rodés se révèlent lourds en termes budgétaires, mais aussi en temps d'instruction, tout cela étant notamment dû à la complexité et la nouveauté des procédés mis en jeux. Ainsi, les motivations principales des différents secteurs industriels restent globalement l'application des normes en vigueur ou leur anticipation. Ceci explique en partie l'engouement relatif dans ce domaine des petites et moyennes entreprises dont les capacités financières sont plus réduites et la vision économique plutôt orientée court terme. Les activités amorcées dans ce domaine sont de ce fait essentiellement établies au sein de grands groupes aux vastes ressources financières. Ils peuvent en effet initier des études prospectives au niveau de leurs centres de recherche et développement qui leur garantiront une position toujours compétitive face à leurs concurrents lorsque les normes environnementales correspondantes à leurs produits seront appliquées, ou même de favoriser par un lobbying approprié une direction privilégiée dans l'établissement des futures normes à mettre en vigueur. Ce type d'étude est aussi largement utilisée dans le cadre du marketing écologique.

Les interactions d'un produit avec son environnement sont nombreuses et disparates. Les objectifs qu'il est envisageable de se fixer lors de la conception d'un produit intégrant des critères environnementaux sont de ce fait aussi abondants qu'hétéroclites. Il est en effet possible :

- d'optimiser l'efficacité énergétique,
- d'optimiser la production,
- de faciliter la maintenance,
- de faciliter la récupération,
- de faciliter le désassemblage,
- de faciliter le recyclage,
- de réduire le nombre et le poids des composants,
- de privilégier un produit de haute fiabilité (c'est-à-dire à longue durée de vie),
- etc.

La diversité de ces propositions souligne le fait que tous les impacts environnementaux ne peuvent pas être envisagés simultanément en tant que critères de conception et être minimisés d'un seul tenant, sachant qu'il demeure d'autres objectifs incontournables arrêtés par des contraintes technico-économiques préalables et surtout par le service utile que doit rendre le produit in fine. Cela se traduit naturellement par des choix stratégiques généralement décidés à l'échelle des secteurs industriels entiers ou parfois même au sein des grands consortiums. Ainsi, certaines entreprises mettent en place leurs propres procédures, intégrant à leurs outils internes de conception des critères environnementaux spécifiques. En effet, la stratégie retenue antérieurement à la production au travers l'étude de conception va au final influencer significativement l'impact global du produit sur l'environnement. L'ensemble des stratégies retenues dans la conception de produits innovants ou l'amélioration de produits existant dans le but de diminuer leurs impacts environnementaux est regroupé sous le terme générique d'*éco-conception* (*design for environment* ou *eco-design* en anglais). Ce terme, très général, recouvre au final un nombre varié de procédures plus ou moins empiriques dont la réalité évolue toutefois graduellement vers de véritables outils de conception à même de proposer désormais des résultats effectifs et quantifiables.

Après un état de l'art sélectif sur la méthode d'analyse sur cycle de vie, ce chapitre explicite les raisonnements communs présidant à toute démarche d'intégration de l'environnement dans la conception d'un produit. Il est en général possible, sous des hypothèses légèrement différentes, d'effectuer des travaux similaires dans le cas d'un site de production. Ces approches circonstanciées à un produit ou à un site sont développées sous le nom de management environnemental et soumises à une normalisation internationale en évolution depuis une dizaine d'années, la série de normes ISO 14000 [ISO96]. Inévitablement, le management environnemental s'applique aussi bien aux sites de production qu'aux produits (un site fabrique plusieurs produits alors qu'un produit transite par plusieurs sites). Ces deux approches distinctes (site ou produit) peuvent être ainsi qualifiées d'orthogonales, mais le recueil des données s'effectue dans les deux cas à leurs intersections. Ainsi, des règles d'affectation empiriques permettent de passer d'une donnée site à une donnée

produit en répartissant la part d'impact des activités du site de production sur l'ensemble des impacts du produit en question. Notons qu'un site « propre » peut très bien produire des objets mal conçus du point de vue de critères environnementaux (sur-emballés, trop gros, trop lourds, etc.). Il est donc possible d'éco-concevoir un produit indépendamment d'un site de production, comme d'éco-concevoir un site indépendamment des produits qui y transitent.

Afin d'être en mesure de minimiser des impacts environnementaux, il faut être capable sinon de les mesurer, du moins de les quantifier en grande partie. C'est là qu'intervient de manière complète ou parfois plus rudimentaire la méthode d'analyse sur cycle de vie. Nous présentons cette méthode dans la première partie de ce chapitre.

L'intégration de l'environnement dans la conception débouche sur des questionnements qui deviennent très vite complexes. A celle-ci répondent un grand nombre de méthodes encore récentes et pouvant donner des résultats inattendus. L'objectif de la deuxième partie de ce chapitre est de présenter un panel de méthodes qui se veut représentatif à défaut d'être exhaustif.

1. La démarche d'analyse sur cycle de vie

L'analyse sur cycle de vie évalue l'impact environnemental d'un produit, d'un service ou d'un site en relation à une fonction particulière, en considérant toutes les étapes de son cycle de vie. Elle représente dans sa version originelle un moyen d'aide à la décision qui répond au besoin de déterminer (au-delà de la disposition pour l'utilisateur de solutions technologiques satisfaisantes) quelles sont les priorités d'action permettant aux activités existantes de se jouer de la limite imposée à leur développement par la capacité d'absorption et les ressources limitées de l'écosystème. Les principes présentés ci-dessous s'appliquent indifféremment à un produit, un service, un site de production ou un système plus complexe. Nous utiliserons indifféremment les termes de système ou de produit lorsque nous désignerons l'objet de l'analyse.

1.1 Le cycle de vie d'un système

Tout produit possède une évolution propre dans le temps et l'espace social. Il a été créé dans un but précis et est utilisé à une fin parfois dissemblable. Cette évolution se décompose en plusieurs étapes simples qui jalonnent ce que nous appelons sa vie et dont les phases majeures sont regroupées à la Figure 1.1 selon l'ordre chronologique courant. Chacune de ces étapes peut être séparée d'un ou plusieurs épisodes de transport, parfois chaque pièce arrivant séparément avant l'assemblage global sur le site final. Il faut de plus acheminer le produit sur son lieu de vente puis d'utilisation et enfin vers la filière de

recyclage (si elle existe) où les différentes composantes matières se séparent à nouveau. Notons que dans le cas de l'étude d'un service, ou d'un site, les étapes de vie peuvent suivre une logique et une chronologie tout à fait différente de celle proposée ici.

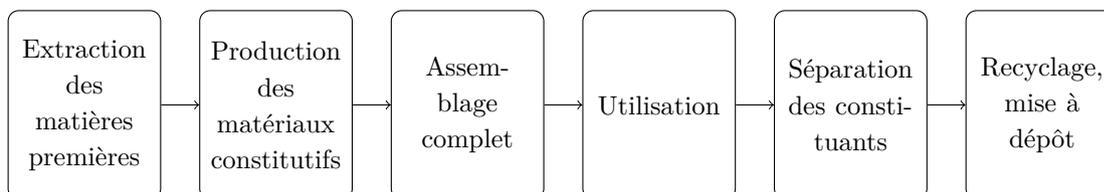


Figure 1.1 – Principales étapes de la vie d'un produit.

Notons que la terminologie de *cycle* provient du fait que la fabrication du système peut inclure des matériaux qui ne sont pas de première main, mais issus de la valorisation de déchets provenant de filières dédiées. Le cycle de vie d'un produit prend alors la forme d'un cercle proposé à la Figure 1.2 représentant aussi les interactions avec l'environnement qui vont être au centre des préoccupations de ce chapitre.



Figure 1.2 – Cycle de vie et impacts environnementaux d'un produit [HHR05].

Les étapes successives de vie ainsi définies présentent l'intérêt de pouvoir être étudiées séparément. Il s'agit là d'une qualité non négligeable lorsqu'elle est utilisée dans l'analyse de systèmes complexes. En effet, ce découplage est tout à fait le bienvenu lors de l'étude de systèmes complets dont les disciplines physiques multiples et fortement couplées ne

facilitent pas la modélisation ni la simulation. Remarquons toutefois que ce découplage, sans conséquence dans l'analyse sur cycle de vie, peut conduire à une erreur grave lors de l'éco-conception : une modélisation trop sommaire peut conduire à l'apparition de transferts de pollution. Il arrive en effet que la minimisation d'un impact environnemental sur une étape du cycle de vie d'un produit en augmente d'autres sur des étapes non prise en compte dans l'étude initiale. Ainsi, sans hypothèse ferme et justifiée, le découplage des étapes de la vie d'un produit, pratiques lors des modélisations et simulations, risque, par transfert de pollution, d'amener des résultats d'éco-conception caduques dont l'identification n'est possible qu'avec une analyse sur cycle de vie complète du produit nouvellement éco-conçu !

1.2 Bref historique

Peu après sa fondation en 1968, le Club de Rome [CRo] impose le concept d'une limitation des ressources impliquant une limite identique au développement économique et démographique. Les premières études présentant des aspects « cycle de vie » datent de la fin des années 60, avec un intérêt prononcé pour l'efficacité énergétique. En 1969, la société Coca-Cola commande ainsi le premier bilan de consommation énergétique associé à différents types de contenants sur leur vie entière, ouvrant la voie à ce que deviendra l'analyse sur cycle de vie. Suivent les conclusions d'un rapport commandé en 1972 au Massachusetts Institute of Technology, MIT : le rapport Meadows [MMRB73]. Constatant que le système planétaire est menacé par une industrialisation excessive, celui-ci propose de substituer l'équilibre à la croissance, opinion jugée trop alarmiste à l'époque. Il s'agit de la première apparition publique d'une proposition de croissance zéro. Ce rapport a été réactualisé en 1993 puis en 2004, preuve s'il en est que ses recommandations sont encore d'actualité.

Dans les années 1970, l'Agence de Protection de l'Environnement Américaine, EPA met en place une méthode d'analyse d'impacts environnementaux en créant une approche connue sous le nom d'*analyse du profil environnemental* (*Resource and Environmental Profile Analysis*, REPA en anglais) [EPA]. Consécutivement au choc pétrolier de 1973, un protocole général est élaboré sur la base de plusieurs études de ce type. Des analyses similaires sont également conduites dans certains pays d'Europe du Nord, particulièrement impliqués dans l'analyse sur cycle de vie, aboutissant par exemple en Angleterre à une méthodologie améliorée, publiée en 1979 et applicable à une grande variété de matériaux : « Handbook of industrial Energy Analysis » [BH79].

Vers la fin des années 1970 les soucis environnementaux se déplacent vers des questions de gestion des déchets dangereux. De ce fait, la logique du cycle de vie est partiellement intégrée aux méthodes d'évaluation des risques utilisées de plus en plus fréquemment dans les politiques publiques afin de développer des normes de protection de l'environnement. De par leur complexité et leur manque de précision d'une part, le coût très bas de l'énergie et l'indifférence écologiste d'une industrie (et d'une consommation) fonctionnant à plein

régime d'autre part, les analyses sur cycle de vie ne sortent que difficilement du confinement d'une petite communauté de scientifiques. Toutefois, à la fin des années 1980 les déchets solides sont devenus un problème touchant gravement certaines nations occidentales. L'analyse du cycle de vie développée dans les études de type REPA sont à nouveau considérées comme une méthode viable pour analyser les problèmes de management industriels et gouvernementaux.

En 1995, les ministres de l'environnement du G7 et de l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques, OCDE s'engagent à intégrer les préoccupations environnementales dans les activités des administrations avec pour objectif de susciter un effet d'entraînement aux retombées industrielles et économiques, appuyé notamment par l'achat de produits plus respectueux de l'environnement. Cette action de responsabilité écologique administrative se décompose en huit axes comprenant la réhabilitation des bâtiments, les économies d'eau et d'énergie, le recyclage des déchets et l'évolution du parc automobile vers une lutte contre la pollution de l'air.

Trois organisations sont alors activement impliquées dans le développement des analyses sur cycle de vie : l'organisation internationale de normalisation, ISO [ISO], la Société de Toxicologie et Chimie Environnementales (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*, SETAC en anglais) [SET] et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement, PNUE (*United Nations Environment Programme*, UNEP en anglais) [PNU]. La première élabore des normes internationales (la série ISO 14000 [ISO96]) qui ont pour but de guider l'ensemble des études justifiant l'emploi d'une accréditation extérieure (finalisé la plupart du temps par un logo sur les produits). La seconde organisation offre une plateforme scientifique d'échanges dans le domaine des analyses sur cycle de vie par le biais de groupes de travail spécialisés. Centrés initialement sur les domaines de la chimie et du génie des procédés (ce qui explique l'avancée des études environnementales dans cette discipline) ces groupes de travail se sont maintenant diversifiés et portent sur quasiment tous les secteurs disciplinaires. La troisième organisation répond à l'appel des gouvernements sous l'égide des Nations-Unies. Elle a pour objectif la promotion des modes de consommations et de productions durables réclamés au cours notamment du sommet mondial sur le développement durable à Johannesburg en 2002. Celui-ci stipule explicitement :

« Nous devons développer des politiques de production et de consommation pour améliorer les produits et services fournis, tout en diminuant les impacts sur l'environnement et la santé, en utilisant, lorsque c'est nécessaire, des approches scientifiques telles que l'analyse du cycle de vie. »

Le principe de l'analyse sur cycle de vie n'en est désormais plus à ses balbutiements. Il a été normalisé en 1997 (révisé en 2006) par l'organisation internationale de normalisation [ISO97]. Des moyens pour intégrer les aspects environnementaux dans la conception et le développement de produits ont de même été édités [ISO02b]. En outre, la SETAC et le PNUE se sont associés en 2002 afin de proposer un partenariat international sur le cycle de vie (*Life Cycle Initiative* en anglais) qui a pour but le développement et la diffusion des

outils permettant l'évaluation des solutions, des risques, des avantages et des inconvénients associés aux produits et services tout au long de leur cycle de vie [LCI]. Par la mise en pratique des approches sur cycle de vie et l'amélioration des outils de support au moyen de données et d'indicateurs quantitatifs, cette initiative sert de cadre institutionnel pour le développement de méthodes d'analyses sur cycle de vie et leur utilisation dans l'industrie.

Parallèlement, les bases de données inventaires d'analyse sur cycle de vie se construisent sous l'impulsion des travaux complets d'analyse sur cycle de vie. Il existe maintenant de nombreuses bases de données disponibles au travers le monde, accompagnées ou non d'un logiciel d'utilisation. Celles-ci sont centrées sur des domaines scientifiques et des régions géographiques spécifiques. La normalisation de ce type d'inventaires permettra de libérer ces bases de données des contraintes liées aux domaines de compétences et des lieux d'implantations de ceux qui les ont originellement collectées, donnant ainsi une dimension planétaire aux analyses sur cycle de vie.

Bien que présentant des atouts non négligeables du fait de la généralité de son étude, l'analyse sur cycle de vie n'est pas encore exempte de points litigieux. Les résultats des analyses de cycle de vie doivent être présentés de façon impartiale et certaines applications donnent encore l'impression que le choix de la méthode dépend du résultat attendu par le commanditaire de l'étude. Un des moyens les plus efficaces pour viabiliser ces études à l'ensemble des domaines de production industriels est bien entendu la normalisation de ses différents aspects et son utilisation généralisée.

1.3 Le cadre des normes

Par opposition à une approche fragmentaire, l'approche sur cycle de vie représente une démarche généralisée qui intègre l'ensemble des stratégies de consommation et de production existantes autour du centre d'étude. La norme ISO 14001 « Systèmes de management environnemental. Spécifications et lignes directrices pour son utilisation » propose un cadre à l'application pratique des principes de l'analyse sur cycle de vie [ISO96]. La définition de l'analyse du cycle de vie donnée dans cette norme est la suivante :

« L'analyse du cycle de vie est une technique qui analyse les aspects environnementaux et les impacts potentiels associés à un produit, en :

- compilant un inventaire des entrants et sortants significatifs d'un système,
- évaluant les impacts environnementaux potentiels associés à ces entrants et sortants,
- interprétant les résultats de cet inventaire et des impacts des différentes phases étudiées en relation avec les objectifs de l'étude.

L'analyse sur cycle de vie étudie les aspects environnementaux et les impacts potentiels tout au long de la vie d'un produit (c'est-à-dire du berceau à

la tombe) et ce de l'acquisition de matière première jusqu'au dépôt, en passant par la production et l'utilisation proprement dite du produit. Les catégories générales d'impacts environnementaux prennent en considération la consommation des ressources, la santé humaine et les conséquences écologiques. »

La normalisation du cadre méthodologique a débuté en 1996 et continue encore à ce jour. Ce cadre offre la possibilité de certifications externes grâce à des auditeurs qualifiés donnant à la protection de l'environnement une dimension incontournable, voire même une stratégie d'entreprise. Cette norme est basée sur la roue de Deming, statisticien dans les années 1950, qui propose un principe d'amélioration continue (la « spirale vertueuse » du management environnemental) parcourue dans le sens des aiguilles d'une montre. Cette roue passe par quatre points dont découlent les différentes normes, comme explicité à la Figure 1.3.

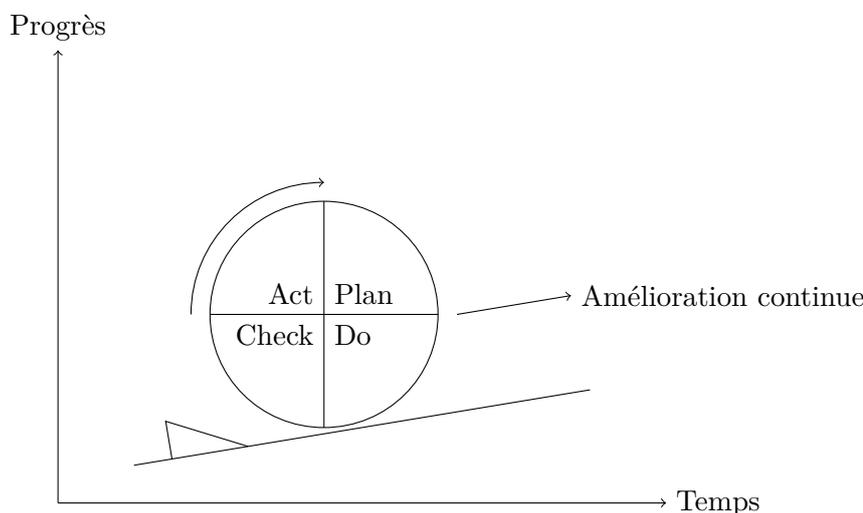


Figure 1.3 – Principe en quatre actes d'amélioration continue de la roue de Deming [Sal99].

Planifier (Plan) - Revue environnementale, fixation des objectifs et cible, programmes d'actions.

Faire (Do) - Mise en œuvre. Définition de l'organisme et des ressources nécessaires, sensibilisation, formation et compétences du personnel, communication, documentation et son contrôle, contrôle opérationnel, préparation et gestion des situations d'urgence.

Vérifier (Check) - Mesure et surveillance, non-conformité, actions préventives et correctives, enregistrements, audits.

Agir (Act) - Revue de direction.

Les quatre points constituant cette « roue vertueuse » servent de base à la constitution des normes environnementales dont la structure est proposée à la Figure 1.4. Nous noterons

la présence d'une norme en 9000 en plus de celles en 14000. Celle-ci découle de normes plus anciennes, dont la première édition date de 1987, puis révisée en 1994 et 2000 [AFN02]. Elles concernent l'audit qualité et environnement (ISO 9011), précisant les exigences (ISO 9001), le vocabulaire (ISO 9000) et les lignes d'améliorations des performances (ISO 9004).

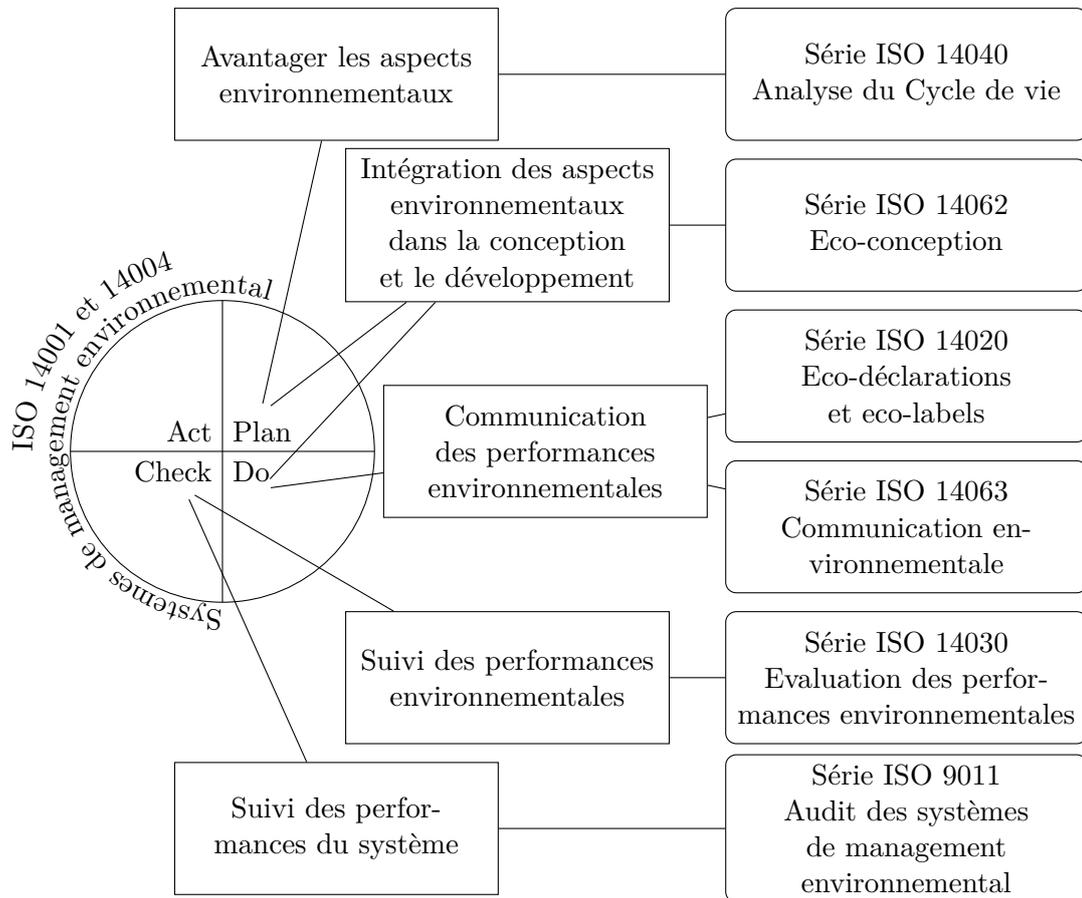


Figure 1.4 – *Modèle cadre de la Norme ISO 14000 [ISO].*

La façon de procéder dans le management environnemental d'un système est donc construite sous forme d'une spirale d'amélioration continue proposée à la Figure 1.5. Cela se justifie par le fait qu'il n'est pas nécessaire de partir d'une situation comportant un niveau élevé de performances environnementales. Ceci est ainsi tout à fait adapté aux évolutions industrielles qui vont chercher dans un premier temps à améliorer des produits déjà existants afin d'exclure les comportements les plus polluants de ces produits dans les schémas stratégiques du management environnemental.

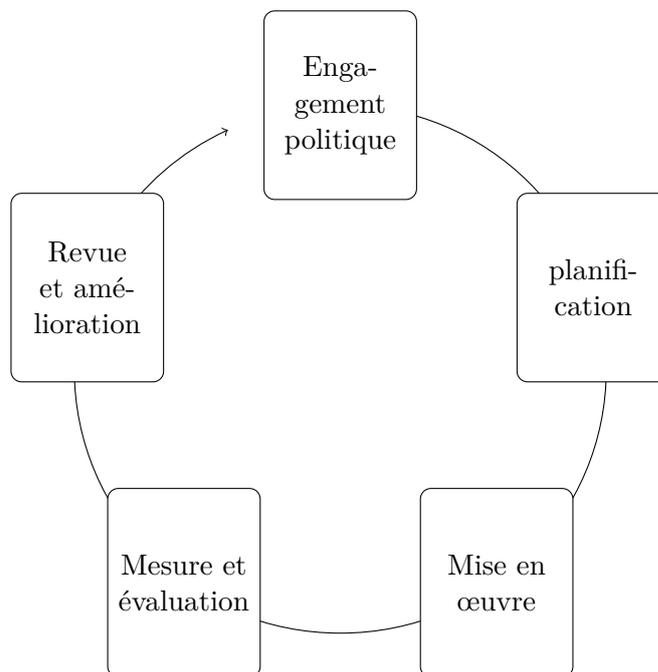


Figure 1.5 – La « spirale vertueuse », principe du management environnemental [Sal99].

1.4 Méthodologie d'analyse sur cycle de vie

L'analyse sur cycle de vie est construite de quatre phases dont les interactions sont représentées à la Figure 1.6.

1. Définition des objectifs et du champ d'étude.
2. Analyse de l'inventaire.
3. Evaluation des impacts.
4. Interprétation des résultats.

Ces quatre points abordés dans une analyse sur cycle de vie ne sont pas figés par un ordre chronologique invariant [Rou98]. En effet, partant de l'interprétation des résultats, il est tout à fait possible de revenir à la définition de l'objectif ou du champ d'étude. Constatant que certaines étapes du cycle de vie provoquent des impacts sur l'environnement prépondérants devant ceux occasionnés au cours des autres étapes ou que certains impacts sont impossibles à évaluer justifie amplement un second examen des objectifs de l'étude. L'analyse sur cycle de vie, de par sa complétude, se caractérise par une somme de travail considérable, suffisamment conséquente pour motiver de fréquents ajustements des hypothèses initiales du fait d'interprétations en cours d'étude.

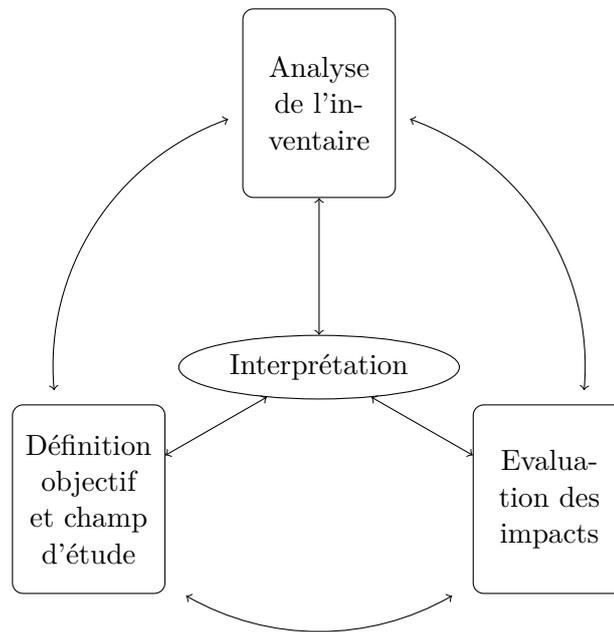


Figure 1.6 – Points clés de l'analyse sur cycle de vie [JSC05].

La phase d'étude relève d'une approche systémique classique, la phase d'inventaire concerne essentiellement le génie des procédés et des systèmes industriels, la phase d'analyse fait appel aux disciplines de toxicologie et d'écologie pour la caractérisation des impacts et enfin la comparaison des bilans environnementaux utilise des méthodes mathématiques d'analyses multi-critères. La phase d'interprétation relève quant à elle de l'aide à la décision et du management environnemental. Ce type d'analyse va donc nécessiter un regroupement d'experts d'horizons divers, pilotés par un ou plusieurs experts en évaluation et management environnemental aux connaissances plus générales. Ce type d'équipe aux vastes compétences trans-disciplinaires n'est pas à proprement parler ce qu'il est possible de réunir dans des structures aux capacités financières modestes. L'apparition de bases de données d'inventaires d'analyse sur cycle de vie de plus en plus fournies permet de passer outre ces restrictions techniques dans le cas d'études à portées locales. Cependant, l'examen d'un système spécifique à une entreprise nécessite toujours l'analyse rigoureuse de ses installations et donc un investissement conséquent qui peut encore en freiner plus d'une.

Les quatre étapes principales d'une analyse sur cycle de vie sont décrites plus en détail en Annexe B page 201. Nous proposons toutefois des remarques sur les deux principaux impacts environnementaux qui vont être utilisés dans les chapitres suivants, à savoir la consommation totale d'énergie sur cycle de vie et le potentiel de réchauffement climatique.

1.5 Deux impacts environnementaux spécifiques

1.5.1 Bilan énergétique total

L'analyse des impacts environnementaux passe par leur connaissance particulière. Ainsi nous présentons un des impacts qui vont servir de critères d'optimisation dans les chapitres suivant : l'énergie globale sur cycle de vie. Il s'agit dans cette approche mono-critère d'analyse sur cycle de vie d'évaluer les dépenses énergétiques inhérentes au cycle de vie d'un produit, hors service utile. Selon la norme NFX 30-110, la définition de cette évaluation s'écrit [AFN98] :

« Somme des énergies dépensées pour la fabrication d'un produit, y compris les énergies dépensées pour l'élaboration des matériaux ou services intéressant directement ou indirectement l'élaboration de ce produit. »

Le contenu énergétique du produit, ce que nous appelons l'énergie globale sur cycle de vie est donc la somme des consommations d'énergie à chaque étape du cycle de vie et des énergies éventuellement récupérées à chaque étape du cycle de vie (nous pensons ici à la co-génération par exemple). Le calcul de l'énergie globale sur cycle de vie dont la préoccupation est d'origine économique s'est enrichie d'une dimension écologique en intégrant le concept de développement durable au travers la réduction de l'impact des activités humaines sur l'environnement.

Unité employée. Le choix de l'unité d'énergie dépend généralement des disciplines principalement concernées par les mesures. D'après l'unité retenue dans le Système International, le Joule (J) et ses multiples sont l'unité retenue dans la plupart des inventaires sur cycle de vie. L'équivalence se fait aussi par l'intermédiaire du Watt-heure (Wh), utilisée dans nos factures d'électricité. Les coûts énergétiques peuvent aussi être exprimés en tonnes-équivalent-pétrole (tep). Une tonne-équivalent-pétrole représente la quantité d'énergie fournie par la combustion d'une tonne de pétrole de qualité moyenne : $1 \text{ tep} = 42 \text{ GJ} = 11600 \text{ kWh}$. Il existe encore d'autres équivalences possibles, comme le baril de pétrole, de 159 L ou 140 kg, qui représente environ 1700 kWh. Afin de rester dans une unité de mesure connue, nous privilégierons l'unité du kWh lorsque nous nous référerons à une quantité d'énergie.

Production d'électricité. Les consommations énergétiques dépendent en pratique du mode de production, du rendement des centrales de production selon l'énergie primaire utilisée et des pertes de transport et de distribution jusqu'au lieu de consommation. L'énergie provient de différentes sources (nucléaire, fossile, hydraulique, etc.) caractérisées par des rendements variables. De plus, le mix énergétique (c'est-à-dire la répartition en puissance installée des différents moyens de production énergétiques) qui alimente localement le

produit dans la réalisation momentanée de son cycle de vie varie significativement suivant l'échelle spatiale retenue. Cet état de fait géographique influence de manière certaine le bilan énergétique total du produit. En effet, les disparités nationales sont très importantes et en raison du couplage des réseaux à l'échelle quasi-continentale, la provenance de l'électricité est rendue encore plus floue, un mix énergétique à l'échelle de l'ensemble du réseau inter-connecté pouvant sembler comme l'hypothèse la moins déraisonnable.

D'autre part, un produit est désormais souvent utilisé loin de son lieu de production, dans une région où la consommation d'énergie impacte l'environnement de façon généralement différente, rendant les calculs fondés sur des moyennes nationales sans grande signification à moins de les rapporter séparément et systématiquement à chacune des étapes du cycle de vie du produit. En outre, cet impact dépend du temps. Par exemple la production d'1 kWh en France génère beaucoup plus de CO₂ en heure de pointe qu'en heure creuse. Nous proposons dans la Table 1.1 le mix énergétique des principaux pays industrialisés dans le monde en 2006. A titre indicatif, le coût énergétique d'1 kWh distribué par les réseaux européens s'évalue à 9,7 MJ. Le rendement moyen de production et distribution se monte donc à 37 %.

Table 1.1 – *Production d'électricité par sources en 2006 [CEA07].*

	Charbon	Pétrole	Gaz naturel	Nucléaire	Hydraulique	Autres
Etats-Unis	50,5	33	18,3	19	6,4	2,5
Brésil	2,5	3	4,7	2	83,7	3,7
Inde	68,7	4,5	8,9	2,5	14,3	1,1
Chine	78,7	2	1	2,1	16	0,1
ex-URSS	19,7	3	41,6	17,8	17,5	0,4
UE	30,6	4,2	20,3	30,5	9,3	5,1
France	5,4	1,3	4	79,1	9,1	1,1
Total mondial, %	40	6,6	19,7	15,2	16,0	2,2

Sites géographiques et sous-produits. A défaut de connaître rigoureusement les consommations énergétiques du site de production, le calcul du coût énergétique d'un matériau, d'un sous-produit ou d'un produit peut se référer aux unités de production les plus modernes et performantes (pourquoi pas éco-conçues), ou alors considérer une moyenne sur l'ensemble des usines en fonctionnement, comprenant notamment les plus vétustes. Il s'agit là d'une convention arbitraire qui représente un choix méthodologique difficile, au final souvent guidé par la disponibilité effective des données au moment de l'étude, mais qui ne doit pas être éclipsé dans le brassage des inventaires d'analyse sur cycle de vie. Il est aussi possible de prendre en compte l'incidence des fluctuations de la demande sur le rendement réel des installations en fonction de la conjoncture économique au moment de l'étude. En effet,

une chaîne de production sous-exploitée propose en général des produits plus chers d'un point de vue économique, mais aussi énergétique.

Enfin, l'approche systémique de la modélisation des produits s'applique aussi à l'approche énergétique de l'éco-conception. Lorsque la fabrication d'un produit entraîne celle d'un sous-produit ne concernant pas directement l'objet de l'étude, il faut être en mesure d'appliquer un pourcentage raisonné sur la consommation d'énergie. De même, beaucoup de chaînes de production fabriquent plusieurs produits simultanément. Quel montant de la consommation énergétique attribuer alors au produit dont l'éco-conception est envisagée? Plusieurs choix sont possibles dans ce cas, et doivent bien entendu figurer dans les hypothèses d'étude. Il est notamment possible de rapporter des pourcentages en masse de produit, en temps de production ou encore prendre en compte la consommation énergétique pour l'ensemble des produits, etc.

Unité fonctionnelle. L'évaluation du bilan énergétique total implique l'évaluation quantitative d'une somme algébrique des dépenses consenties et des gains énergétiques obtenus à chacune des étapes considérées du cycle de vie du produit. Généralement nous avons tout d'abord l'obtention des matières premières et la fabrication des matériaux ainsi que leur transformation, puis l'assemblage des éléments, l'utilisation de l'objet fini incluant le fonctionnement, l'entretien et enfin son élimination, avec ou sans valorisation. Il s'agit d'un coût énergétique car l'énergie consommée par le produit n'est généralement pas récupérable. Cette évaluation ne se fait pas pour une masse unitaire de produit. En effet, la comparaison à masse ou volume égaux permettra par exemple de différencier deux sites de production mais la comparaison entre deux produits se base toujours sur la notion de service rendu équivalent, ou unité fonctionnelle, présentée précédemment. Cette unité d'usage permet de concevoir un produit pour un service à rendre et non plus d'adapter un service à la structure récemment mise au point.

La plupart de ces coûts énergétiques se présentent sous forme de consommations, donc des coûts algébriques négatifs. Il convient cependant de souligner que ce n'est pas toujours le cas. La fabrication d'un objet peut par exemple se faire à partir d'un certain pourcentage de matériaux recyclés, introduisant par là un bouclage dans la vie du produit qui justifie pleinement le terme de cycle de vie. L'utilisation d'un produit peut, par l'intermédiaire de la co-génération, devenir productrice d'énergie (notamment sous forme électrique). Enfin l'élimination des produits (source de travaux considérables en cours et en perspectives) peut remplir un rôle non négligeable de limitation de la consommation, voire de production d'énergie, ne serait-ce que par incinération des déchets. Une valorisation des matériaux dans le domaine du Génie Electrique, même partielle, devient actuellement de plus en plus profitable économiquement, en plus d'écologiquement, du fait de l'envolée du prix des matières premières de construction comme le cuivre, l'aluminium ou encore le fer [Sco].

1.5.2 Potentiel de réchauffement climatique

L'effet de serre est un impact environnemental relativement bien connu du grand public. En effet, il bénéficie d'une médiatisation significative du fait de l'importance croissante et constatée du changement climatique.

Le diagramme présenté à la Figure 1.7 effectue un bilan total des sources et des activités productrices de gaz à effet de serre dans l'ensemble de l'économie mondiale en 2000. Le transport, l'utilisation et la production de l'énergie sont responsable de la majorité des émissions de gaz à effet de serre. Tous les calculs sont exprimés en potentiel équivalent de réchauffement climatique (kilogramme de CO₂ équivalent sur une base de 100 ans du GIEC, groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 1996 [GIE]), sur la base d'une estimation du total mondial de 41,7 Mt de CO₂ équivalent. L'utilisation des terres comprend à la fois l'émission et l'absorption de gaz à effet de serre. Les lignes en pointillé représentent les flux de moins de 0,1 % du total des émissions de gaz à effet de serre.

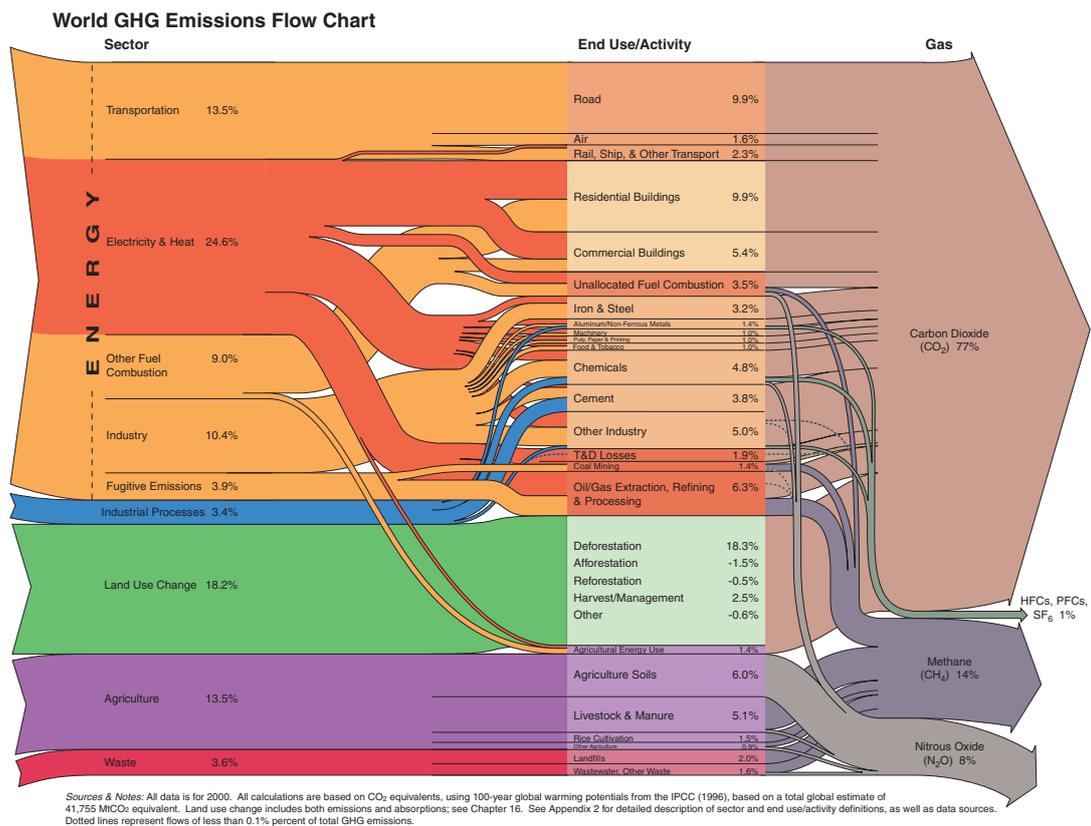


Figure 1.7 – Répartition des émetteurs de gaz à effets de serre à l'échelle mondiale en 2000 [WRI].

Le soleil émet vers l'extérieur un rayonnement électromagnétique dont une partie parvient au niveau de l'atmosphère terrestre. Un tiers est réfléchi vers l'espace par l'ensemble atmosphère Terre (phénomène d'albédo). Une partie des rayonnements ultraviolets est absorbée par l'ozone stratosphérique, tandis que les rayonnements infrarouges sont capturés par les gaz à effet de serre à la limite de la troposphère (il s'agit principalement de vapeur d'eau, de dioxyde de carbone et de méthane). La surface du sol, échauffée par le rayonnement solaire, émet vers l'atmosphère un rayonnement infrarouge qui se retrouve piégé par les gaz à effet de serre. Ces molécules émettent à leur tour un rayonnement infrarouge contribuant à l'échauffement du sol et de l'atmosphère. La chaleur se retrouve ainsi piégée dans l'atmosphère aux pertes atmosphériques près. L'augmentation de la teneur en gaz à effet de serre de l'atmosphère amplifie globalement ce phénomène de capture de la chaleur.

Nous présentons dans la Table 1.2 le top douze des pays les plus polluants du point de vue du bilan carbone, c'est-à-dire l'émission de CO₂. Deux résultats sont présentés, ramenant les émissions de CO₂ de chaque pays en 2004 à un pourcentage des émissions planétaires de CO₂ et d'autre part en ramenant ces émissions au nombre d'habitants. Les résultats obtenus ne sont pas identiques, soulignant les différences culturelles et sociales amenant à un bilan carbone plus ou moins sévère par habitant suivant le pays.

Table 1.2 – Douze pays principaux émetteurs de CO₂ en 2004 ainsi que l'émission de CO₂ par habitant pour ces pays [WRI].

Pays	Tonne de CO ₂ par habitant	Pourcentage mondial total
Etats-Unis	20	20
Chine	4,5	17
Russie	11	5
Japon	10	4,5
Inde	2,5	4
Allemagne	10	3,5
Angleterre	9,5	2,5
Canada	13	3,5
Corée du Sud	13	2,5
Italie	8	4,5
Afrique du sud	9	2,2
Mexique	5	2
Monde	2	71,2

Nous proposons dans la Table 1.3 les différentes contributions au potentiel de réchauffement climatique à l'échelle de la France. Compte tenu de la nature de l'énergie primaire utilisée en France, l'industrie et les transports sont majoritairement les plus émetteurs de gaz à effet de serre.

Table 1.3 – Contribution en 2004 des différents secteurs à l'impact de potentiel de réchauffement climatique en France [CCf].

Secteur d'activité	Contribution à l'effet de Serre, %
Transports	26
Industries	20
Agriculture, forêts	19
Bâtiments	19
Production d'énergie	13
Traitement des déchets	3

Un extrait de base de données inventaire d'analyse sur cycle de vie sur deux impacts environnementaux (énergie primaire non renouvelable et potentiel de réchauffement climatique) et quatre ensembles de systèmes (production d'énergie électrique, production de matériaux focalisée sur les métaux du Génie Electrique, procédés de transformation de ces métaux et transport par différents moyens) est proposé en Annexe A, Table A.1 et Table A.2.

Conclusion partielle

Les « approches cycle de vie » regroupent de nombreux avantages. En effet, leur généralité évite de déplacer les problèmes d'une étape du cycle de vie à une autre ou d'un milieu à un autre (air, eau, sol, etc.). Elles assurent de même des bénéfices environnementaux globaux qui prennent notamment en compte les aspects sociaux et économiques. Leur utilisation crée une plate-forme de dialogue commune à tous les acteurs susceptibles d'influencer la conception des produits et des services qui leur sont associés (réflexion sur un démantèlement et le recyclage lors de la conception par exemple). Enfin, une approche sur cycle de vie favorise à long terme l'adoption d'un mode de consommation et de production plus durable, par simple économie de ressources ou contribution à l'amélioration continue des pratiques industrielles et commerciales. Des études aussi pluridisciplinaires que les analyses sur cycle de vie stimulent aussi grandement le développement de l'expertise, le partage de connaissances et leur intégration à d'autres outils en fonction des différentes applications.

La contrepartie directe de la globalité potentielle d'une analyse sur cycle de vie est que l'étude complète est rendue difficile sans hypothèses simplificatrices. Les hypothèses se font généralement sur les frontières du système, sur les impacts environnementaux considérés et sur les phases du cycle de vie. Une grande aide vient de l'établissement des bases de données d'inventaires d'analyse sur cycle de vie, mais là encore apparaît un autre écueil à savoir la grande disparité entre les différents inventaires d'analyse sur cycle de vie. L'ensemble de ces considérations mène les analyses sur cycle de vie à des résultats qui

peuvent souvent être remis en cause ou du moins discutés. Il convient de garder un esprit critique vis-à-vis des affirmations insuffisamment justifiées et documentées.

2. L'éco-conception

2.1 De l'analyse sur cycle de vie à l'éco-conception

Les critères d'efficacité-coût semblent désormais déphasés par rapport aux enjeux réels de la société selon une vision moins capitaliste [Bar93]. De par sa généralité, l'analyse sur cycle de vie propose ainsi une démarche que nous pouvons qualifier de durable en ce sens qu'elle couvre l'intégralité de la vie des centres d'études, engendrant un couplage incontestable entre les fonctionnalités au niveau du service rendu et les performances environnementales.

Il s'agit ainsi d'étudier des fonctions répondant à un besoin spécifique de systèmes de consommation dont l'ensemble de l'évolution optimisée n'excède pas les capacités de notre écosystème. Comme nous l'avons vu précédemment, l'analyse sur cycle de vie nécessite la définition du service ou du produit étudié par l'intermédiaire de frontières nettes puis le compte de tous les échanges entre le produit et ce qui lui est extérieur. Cette démarche doit être répétée de la fabrication à la mise en dépôt du produit. Dans une analyse sur cycle de vie complète il en va de l'ensemble des flux transitant à travers la frontière précédemment évoquée. Tous les rejets de produits, toxiques ou non, les émissions de matière, d'ondes et même de sons dans les analyses plus tournées vers l'impact sur l'homme sont censés être pris en compte.

Délimiter une frontière avant l'inventaire des impacts du produit sur « l'extérieur » puis recenser et quantifier tous les entrants et sortants traversant cette frontière nécessite de négliger certaines contributions devant d'autres. Il est en effet difficile d'être complètement exhaustif dans cette analyse car il est tout simplement impossible de quantifier correctement certains impacts dont la physique est mal connue (il s'agit souvent de toxicologie humaine sur le long terme ou de rejets à impacts multiples). Toutes ces notions évoluent au fur et à mesure de l'amélioration des connaissances que nous en avons. Nous constatons de plus qu'il sera d'autant moins aisé de faire de telles analyses non plus sur des produits existants, mais sous la forme de prévisions, dans le cadre d'une éco-conception.

Une normalisation est en général utilisée afin de comparer et d'agréger les différents impacts écologiques cumulés par le sujet d'étude. En dernier lieu, il reste à hiérarchiser les impacts selon des critères cohérents avec l'étude, puis chercher à les minimiser, ce qui se traduit souvent par une optimisation multi-critères. Il apparaît ainsi que l'éco-conception encore plus que l'analyse sur cycle de vie va entraîner un nombre significatif de choix

auxquels le résultat final de l'analyse va se révéler très sensible. Ces choix doivent donc impérativement figurer dans l'analyse des résultats.

En se basant sur les principes de l'analyse sur cycle de vie, l'éco-conception consiste en une analyse prévisionnelle des impacts environnementaux d'un produit dans un but préventif. Ainsi, les critères praticables pour des modélisations puis des simulations sont favorisés lorsqu'ils restent compatibles avec les formulations classiques de conception. Notons que cela peut tout à fait augmenter les durées de recherche et développement des produits, ce qui est cohérent avec l'impact qu'elles ont sur le produit final que ce soit en termes de durée de vie, de temps de rentabilité, etc.

La deuxième difficulté qui apparaît de manière plus prononcée en éco-conception qu'en analyse sur cycle de vie est bien entendu le choix de l'unité de mesure des impacts environnementaux à minimiser. Il faut en effet adapter les différentes grandeurs de quantification à une unité normalisée, qui permettra une comparaison raisonnée. Comment en effet comparer une énergie consommée lors de l'utilisation et une masse de produits toxiques rejetés dans l'atmosphère lors de la fabrication si ce n'est sous forme de critères distincts, aucun ne pouvant être préféré à l'autre autrement qu'arbitrairement. Nous introduisons ici la notion d'optimisation multi-objectif.

2.2 Critères environnementaux dans la conception

Le terme « éco-conception » est naturellement employé pour exprimer la prise en compte des aspects environnementaux dans la conception des produits. Malheureusement, ce terme recouvre des réalités très diverses, qui proviennent simplement du fait qu'il n'existe pas un unique type d'impact sur l'écosystème. En effet, focalisée sur un seul aspect environnemental, une amélioration peut engendrer des dégradations d'autres aspects et rendre le principe d'éco-conception caduque. Ces dérives possibles, provoquées notamment par une demande spécifique de produits à éco-labels, sont évitées par l'étiquetage précis des impacts sur lesquels va porter l'optimisation. Un développement conscient de l'environnement considère au final la protection générale de l'environnement au même titre que le service rendu ou la qualité d'un produit.

Les impacts environnementaux s'additionnent à chaque étape du cycle de vie du produit. Une fois la conception du produit achevée, il reste donc très peu de marge de manœuvre pour les réduire. Nous pouvons observer ceci de façon simplifiée à la Figure 1.8. Par l'intermédiaire de l'éco-conception, il est ainsi possible de réduire à chaque étape du cycle de vie les impacts, voire de réduire le cumul total par exemple en optant pour des matériaux facilement recyclables ou valorisables (ce qui explique l'amélioration constatée en fin de vie). De plus, les solutions existantes échappent dans la plupart des cas à l'entreprise qui fabrique les produits (filrière de recyclage en fin de vie) même si elle en conserve la responsabilité en tant que filrière productrice. Les réglementations internationales commencent d'ailleurs à chiffrer les surcoûts dus aux filières de fin de vie. Les

coûts d'élimination des filières non éco-conçues, du fait de taxes de plus en plus lourdes, deviennent donc plus élevés que ceux des procédés d'éco-conception, malgré un certain investissement à court terme.

Au fur et à mesure des étapes de développement d'un produit, les marges de choix techniques se rétrécissent et les possibilités de diminuer les impacts environnementaux s'amoindrissent d'autant, comme nous pouvons le constater à la Figure 1.8. Il reste cependant une autre niche de réduction des impacts environnementaux possible dans la phase d'utilisation du produit, dictée par les comportements sociaux. Celle-ci n'est pas prise en compte, car non modifiable dans une étude d'éco-conception.

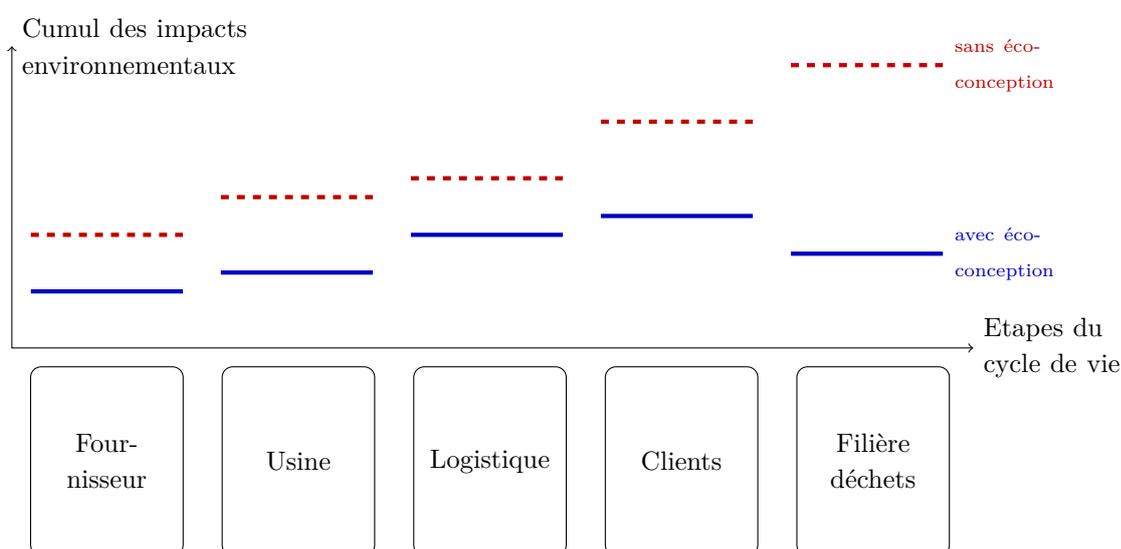


Figure 1.8 – Exemple de cumul d'impacts environnementaux sur chaque étape du cycle de vie d'un produit avec ou sans éco-conception [Bou04].

Parce qu'elle se situe en amont des décisions principales de production et de vente, l'éco-conception est une démarche préventive. En effet, où, mieux que durant la phase de conception, peut-on réduire à la source de futurs impacts sur l'environnement ? Quels choix, sinon ceux de conception, influent-ils le plus sur les caractéristiques environnementales ultérieures des produits ? Notons toutefois que cela nécessite de pouvoir modéliser à priori les impacts environnementaux du produit éco-conçu.

L'une des caractéristiques essentielles de l'éco-conception est que seule son appropriation par le concepteur et son intégration au sein de ses propres pratiques et outils conduisent à des bénéfices environnementaux optimaux : il n'existe pas d'outil « clef en main » dont la seule mise en œuvre permettrait « d'éco-concevoir » tout produit. Ainsi, une méthode d'éco-conception devient rapidement spécifique au produit conçu. L'éco-conception d'un produit fige son cycle de vie, ce qui empêche à priori de changer de site de production ou de lieu de consommation une fois la structure conçue sous peine de pou-

voir diminuer la validité des résultats de conception. La notion de produit « standard » est donc perdue. Afin de standardiser à nouveau cette démarche de conception il faut définir et introduire un critère permettant de découpler la conception du produit de ses lieux de production et d'utilisation.

2.2.1 Les initiatives gouvernementales et industrielles existantes

Il est possible d'améliorer un produit selon des critères environnementaux avant de penser à les intégrer dans la conception de nouveaux produits. Afin de simplifier l'affichage des efforts environnementaux concédés lors de la conception de produits commercialisés, il existe désormais des certifications qui peuvent aller de la plus fantaisiste à la plus rigoureuse. Ces labels écologiques apposés sur les produits sont recherchés par la plupart des industriels, garantissant une orientation positive à leurs campagnes de marketing.

La politique intégrée des produits [IPP] appliquée désormais à l'échelle européenne propose de stimuler la demande des consommateurs pour les produits plus écologiques, d'inciter les industriels à développer leurs offres de produits plus écologiques et d'utiliser le mécanisme de fixation des prix (TVA différenciée, extension de la responsabilité des fabricants, etc.). Tout ceci est résumé dans le livre vert de la Commission européenne sur la politique intégrée des produits [CCE01].

« Politique publique qui vise ou est adaptée à l'amélioration continue de la performance environnementale des produits et services dans le cadre d'une approche cycle de vie. »

Les moteurs futurs du développement de l'éco-conception sont donc la diffusion croissante du management environnemental, par l'intermédiaire des normes, de l'établissement d'une politique intégrée des produits promulguée par la communauté européenne, associée à l'élaboration de directives sur les produits en fin de vie (comme les produits électriques et électroniques par exemple). La tendance à un meilleur respect de l'environnement de la part des administrations, ainsi que les éco-labels et éco-profil tendent quand à eux à une sensibilisation croissante des consommateurs aux problèmes environnementaux que rencontre notre société.

Suite à une série de directives visant à bannir l'utilisation de produits dangereux, ou encore la gestion de déchets électroniques, la commission européenne a statué en 2005 sur l'analyse globale de l'impact environnemental des produits consommant de l'énergie. En effet, la directive européenne 2005/32/CE du parlement européen et du conseil établit un cadre qui permettra à terme de fixer des exigences en matière d'éco-conception. Notons toutefois que cette directive ne concerne que les produits consommateurs d'énergie, dont la définition est la suivante :

« Un produit qui, une fois mis sur le marché et/ou mis en service, est dépendant d'un apport d'énergie (électricité, combustible fossile et source d'énergie renouvelable) pour fonctionner selon l'usage prévu, ou un produit permettant la génération, le transfert et la mesure d'une telle énergie, y compris les pièces dépendant d'un apport d'énergie, prévues pour être intégrées dans un produit consommateur d'énergie visé par la présente directive et qui sont mises sur le marché et/ou mises en service sous la forme de pièces détachées destinées aux utilisateurs finals et dont la performance environnementale peut être évaluée de manière indépendante. »

Ceci implique que les produits vendus au sein de l'Union Européenne devront non seulement être de sobres consommateurs énergétiques au niveau de leur utilisation (suivant l'exemple des classements par apposition d'une lettre aux appareils électroménagers) mais aussi durant leur phase de production et d'élimination. Cette première directive est dirigée vers la consommation d'énergie ainsi que de matière première. Il s'agit cependant indubitablement d'un premier pas dans la direction d'une industrie éco-consciente. Tout ceci s'applique sous peine de sanctions « efficaces, proportionnées et dissuasives », avec une mention spéciale pour la consommation en vieille des appareils électriques.

Les éco-labels. Présentés à la Figure 1.9, ils apportent une certification officielle de la qualité écologique d'un produit. Il s'agit d'une marque demandée volontairement par les industriels et accordée sélectivement si leurs produits sont conformes aux critères de labellisation. Définis par approche multi-étapes et multi-critères, ces critères varient d'une catégorie de produit à l'autre. Les éco-labels sont délivrés par un organisme de vérification tiers (AFNOR Certification en France) et révisée tous les deux ou trois ans. Leur objectif est bien entendu de promouvoir la conception, la commercialisation et l'utilisation de produits ayant un moindre impact sur l'environnement, mais aussi d'informer les consommateurs sur les impacts environnementaux.



Figure 1.9 – Eco-labels français, européen et de différents autres pays [ELa].

Les auto-déclarations environnementales. Celles-ci sont sous la seule responsabilité du fabricant ou du distributeur. L'absence du contrôle extérieur rend leur crédibilité faible, et les abus nombreux. La série 14021 de la norme ISO 14000 propose toutefois les exigences auxquelles doivent répondre les déclarations environnementales : claires, transparentes, scientifiquement solides et documentées.

Les éco-profils. Ils sont une traduction partielle de résultats d'analyse sur cycle de vie sous forme de chiffres et graphiques (*Environmental Product Declaration* en anglais). Il pourra bientôt s'agir d'informations standardisées qui pourront permettre au consommateur de comparer des produits entre eux. Par exemple Volvo publie pour chacun de ses véhicules une brochure regroupant ses caractéristiques environnementales principales. Dans le domaine du génie électrique, nous pouvons aussi citer l'exemple d'ABB qui propose des éco-profils d'un grand nombre de ses produits [ABB01a, ABB01b, ABB03a, ABB03b, ABB03c, ABB00, ABB02, ABB04].

Il existe aussi d'autres types de logos, centrés sur la fin de vie des produits qui facilitent l'identification des matériaux lors du tri sans présumer de la recyclabilité des produits qui les portent. Enfin le logo Point-vert ou éco-emballage signifie que le producteur contribue financièrement aux dispositifs aidant les communes à développer les collectes sélectives des déchets d'emballages afin de les valoriser : il ne présume en rien du recyclage potentiel et effectif des produits qui les portent. Ceci entraîne une dernière remarque sur le vocabulaire employé par l'éco-marketing. La plupart des produits labellisés comme possédant un certain pourcentage de leurs constituants recyclables n'entre en réalité absolument pas dans une logique de valorisation en fin de vie. En effet, il convient de faire la distinction entre recyclable et recyclé. Beaucoup de matériaux recyclables ne sont en fait pas recyclés tout simplement par absence de filière adéquate équivalente à celle qui est en place pour le verre en France par exemple.

2.2.2 Complexités supplémentaires dans la conception

Pendant l'éco-conception, une fois tous les impacts environnementaux ramenés à une échelle commune, interviennent les différentes possibilités d'optimisations qui ajoutent encore une dimension à un problème déjà largement ouvert. Il s'agit en effet d'intégrer dans l'optimisation l'ensemble des connaissances rassemblées autour du produit en cours de conception. En plus du service rendu indispensable, il faut assurer des performances globales intéressantes, incorporer les couplages qui influencent grandement les comportements de l'ensemble et simuler des impacts environnementaux choisis comme les plus pertinents suivant le type d'utilisation prévu et modélisé. Nous avons affaire, en termes de conception, à un système dont la complexité constitue un obstacle majeur dans son optimisation.

Ces éléments de natures et de fonctions différentes sont néanmoins le siège d'interactions fortes, dont la pluridisciplinarité entraîne des difficultés à la représentation et à la caractérisation. Ces couplages vont se répercuter sur l'approche de conception en conditionnant les propriétés des éléments par rapport aux objectifs désirés [Reg03]. Dans les domaines du génie électrique qui nous concernent, nous pouvons croiser des couplages sous différentes formes classiques :

- le couplage entre les éléments du système qui impliquent une dépendance directe entre des caractéristiques intrinsèques des éléments par rapport à leur environnement proche (par exemple la résistivité dépend de la température des matériaux considérés),
- le couplage entre les disciplines, lié à l'hétérogénéité des systèmes modélisés ainsi qu'à la cohabitation de phénomènes physiques distincts (une modélisation thermique nécessite une modélisation mécanique, si rudimentaire soit-elle),
- le couplage avec l'environnement dans lequel le système évolue (il s'agit du fondement de l'analyse sur cycle de vie),
- le couplage avec l'utilisation réelle qui est faite du produit, comportement social qui peut être en contradiction avec le service utile initialement prévu pour le produit (modélisation thermique transitoire pour de mauvaises utilisations, durée de vie, etc.).

L'introduction de critères d'optimisations novateurs implique malheureusement de nouveaux couplages en termes de simulations présentant une complexité non négligeable dans l'établissement d'une part des modèles mais aussi, et surtout, lors d'une mise en place la plupart du temps informatique. Cette étape, concernant moins l'interprétation des résultats que leur obtention, représente à elle seule une source de problèmes ainsi que de temps de travail tout à fait conséquente. Aux couplages évoqués précédemment viennent donc s'ajouter :

- le couplage au cours du processus de conception entre les étapes de choix de la structure à dimensionner, de son mode d'alimentation, de son cycle de vie,
- le couplage entre les ressources disponibles, les solutions proposées et les besoins des consommateurs. Afin de minimiser les impacts divers d'un produit, il faut bien entendu l'intégrer parfaitement à une place ou « une niche de production » spécifique sans pour cela créer de nouveaux besoins donc de nouvelles consommations de ressources (notons qu'il ne s'agit pas là d'un objectif directeur classique!).

Des couplages présentés à la Figure 1.10 proviennent les complexes itérations du processus de conception permettant de parvenir à une estimation, puis une prédiction correcte ou simplement suffisante du comportement global d'un système à partir du comportement local des éléments modélisés séparément. Nous pouvons donner comme exemple la prise en compte du vieillissement des isolants entourant les bobinages d'une machine électrique, qui dépend des cycles thermiques imposés à la machine par la consommation de puissance de la charge et qui va jouer sur la durée de vie de la machine, sa réparation (de type re-bobinage) ou plus probablement son remplacement.

Une des possibilités d'étude d'un système multi-physique, celle que nous privilégierons dans ces travaux, est la recherche de configurations optimales par une approche de conceptions simultanées. L'ensemble des éléments sont décrits et simulés ensemble, reliés par leurs différents couplages, permettant ainsi de tester un grand nombre de structures en un temps relativement restreint. En effet, ce principe nous permet de disposer à notre convenance du nombre de paramètres de description, d'objectifs ainsi que de contraintes d'optimisations. Cela permet la mise en place de problèmes multi-critères et multi-objectifs. Il s'agit dans notre cas d'une méthode multi-critère évolutionnaire, qui permet de disposer d'un ensemble de solutions acceptables, offrant ainsi une grande richesse de conception (sous forme d'aide à la conception). Selon le choix des critères et des objectifs contradictoires de conception, une structure optimale unique ne peut pas être obtenue. Dans ce cas, l'affichage de solutions multiples nous permet de visualiser la sensibilité des résultats à différentes variations de paramètres, à la précision ou au choix du modèle, à des données d'analyse sur cycle de vie, etc. Il s'agit précisément de ce que nous voulons mettre en œuvre vis-à-vis de la méthodologie d'éco-conception.

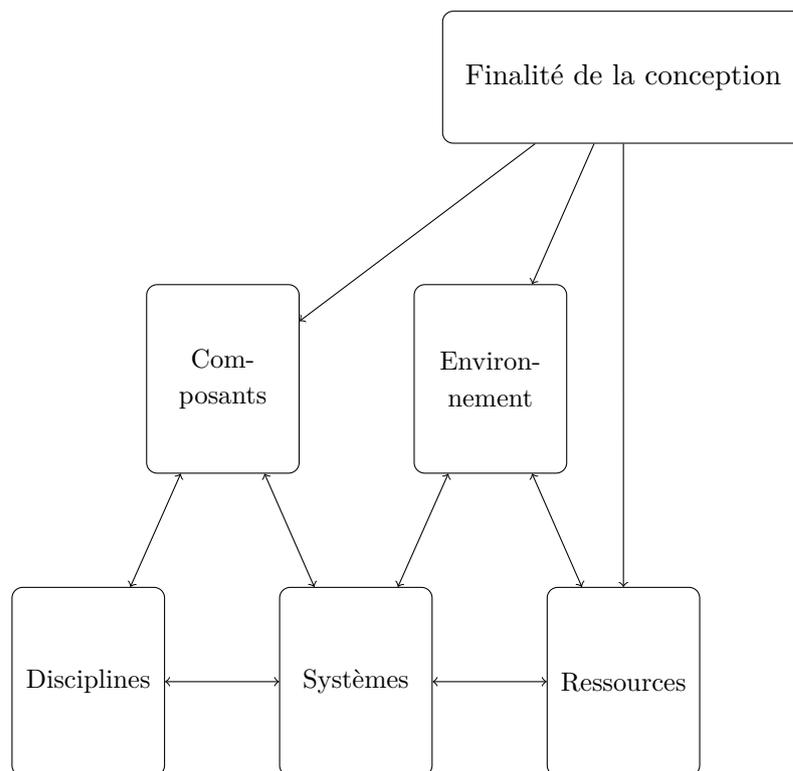


Figure 1.10 – Principaux couplages présents lors de la conception d'un système [Reg03].

Même si, d'une façon générale, les produits électriques et électroniques ne sont pas considérés comme polluants au sens usuel du terme, ils nécessitent, comme tout produit, des matières premières et de l'énergie pour être fabriqués. Comme tout produit également, ils génèrent, directement ou indirectement des émissions vers l'air, l'eau et le sol,

qui contribuent aux divers effets sur l'environnement. Notons que la production de l'énergie électrique nécessaire à leur fonctionnement constitue le plus souvent un impact environnemental non négligeable. Dans cette perspective, une approche multi-critères laissera une grande souplesse à la recherche de compromis dans la conception tout en assurant une réduction globale de la plupart des impacts, mais alourdira inévitablement la conception selon les autres critères. Nous pouvons aussi nous limiter tout d'abord à un des impacts principaux, tout en gardant en tête l'optique d'amélioration continue de l'analyse sur cycle de vie, c'est-à-dire qu'à chaque nouvelle génération de produit une réduction progressive des impacts est introduite.

La limitation à un ou quelques impacts environnementaux a été notamment pratiquée lorsque les premières analyses de cycle de vie concernant des produits déjà finis. Il ne s'agit pas ici d'introduire l'environnement au détriment des autres préoccupations, mais de chercher un optimum de compromis. Comme proposé schématiquement à la Figure 1.11, la solution retenue doit idéalement se situer dans la zone de chevauchement des quatre critères que sont l'environnement, les attentes client, la faisabilité technique et la maîtrise des coûts.

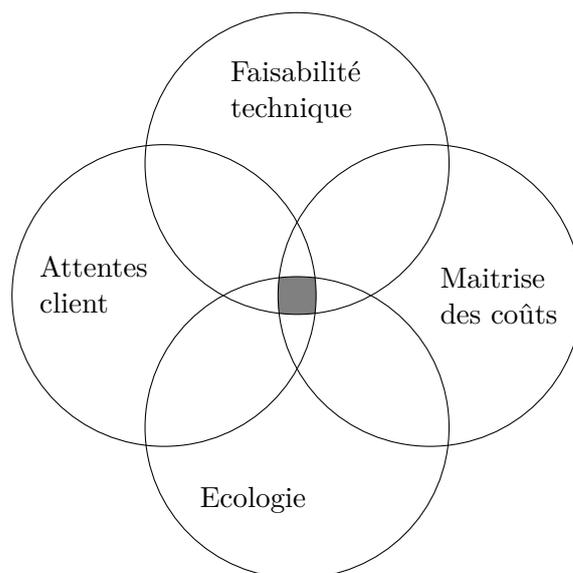


Figure 1.11 – Réduction de l'espace des solutions techniques par l'intégration de l'environnement dans la conception d'un produit [ISO02b].

En effet, intégrer en tant que critère complet l'analyse sur cycle de vie ne semble pas immédiatement réaliste tant les hypothèses sont nombreuses, contraignantes et pour la plupart inaccessibles dans un temps d'étude imparti. Chaque étape de conception peut être subdivisée en sous-étapes de plus en plus précises, comme présenté à la Figure 1.12. C'est pourquoi nous proposerons de restreindre l'analyse de cycle de vie à certains critères clefs, comme la seule consommation d'énergie ou le potentiel de réchauffement climatique.

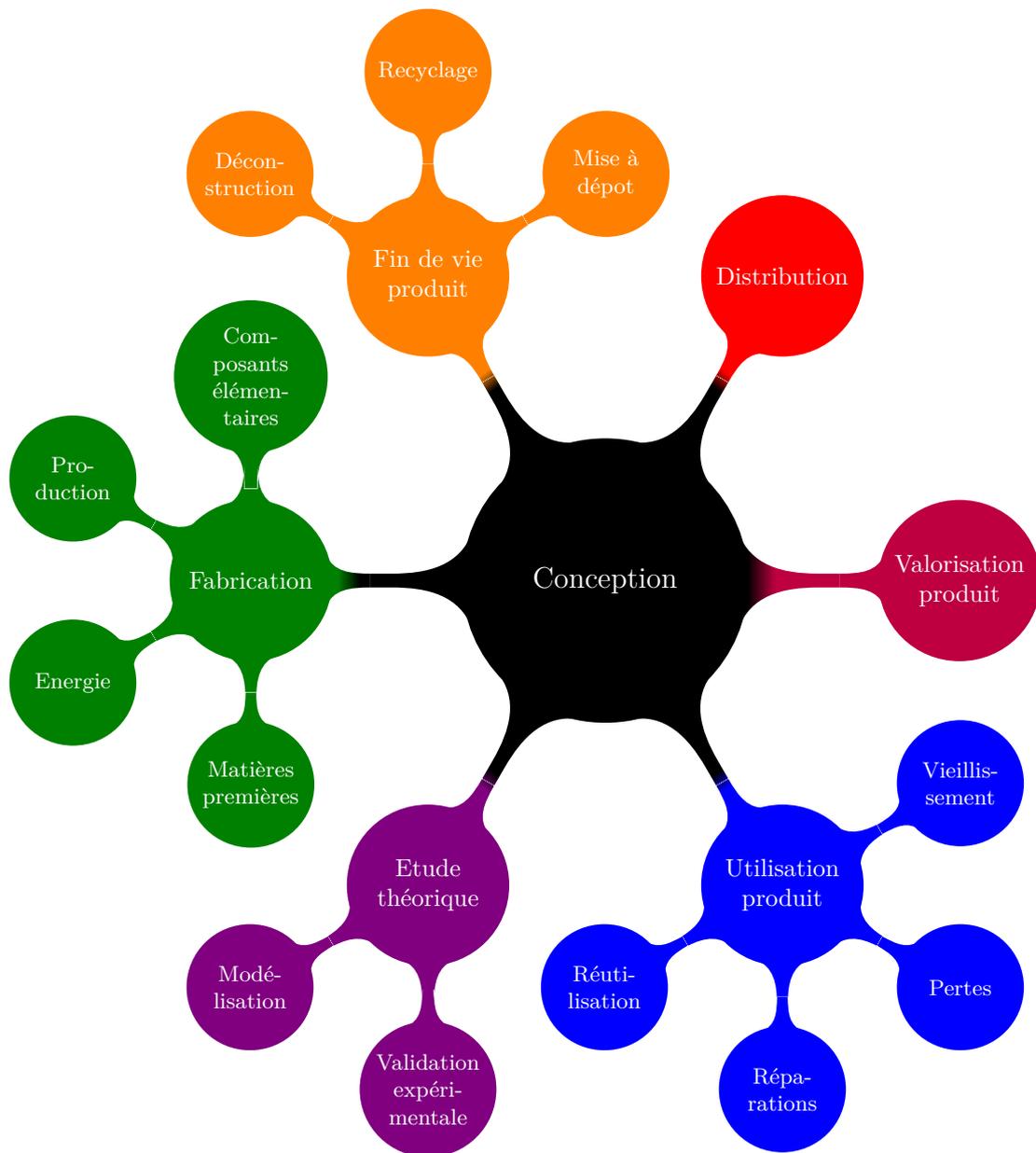


Figure 1.12 – Ramifications des thématiques abordées lors d'une démarche d'éco-conception.

Notons enfin que l'optimisation du service rendu est souvent en contradiction avec les fonctionnalités « inutiles mais indispensables » qui caractérisent les produits intégrant un grand nombre d'innovations technologiques. Par exemple, la démarche d'escalade à l'intégration et la miniaturisation technologique, bien que comportant des avantages certains, n'est pas à proprement parler une démarche à fort potentiel écologique (notamment du point de vue des impacts environnementaux liés aux processus de fabrication des circuits miniaturisés, de la diminution des durées de vie liées à cette miniaturisation, etc.).

2.3 Démarches d'éco-conception

Dans l'objectif d'améliorer les performances environnementales d'un produit et à partir d'une démarche préventive, optimiser les efforts environnementaux, nous allons tenter bien évidemment d'agir là où les impacts sont les plus importants, tout en évitant les transferts de pollution. Pour réduire les impacts, il faut obligatoirement maîtriser les flux entrants et sortants entre le produit et l'environnement. Un flux peut engendrer plusieurs impacts et plusieurs flux peuvent contribuer à l'aggravation d'un même impact. Il ne faut bien sûr pas perdre de vue le fait que l'ensemble des phénomènes évoluent au cours du temps ! L'analyse sur cycle de vie s'intéresse principalement aux flux de matière et d'énergie qui s'échangent entre le système étudié et l'extérieur au niveau de la frontière mise en place avec les objectifs d'étude. Ce sont les flux élémentaires, ainsi qualifiés car ils ne sont pas transformés par l'homme et correspondent donc à des équivalents de prélèvement de ressources ou des émissions de rejets. Les flux non élémentaires représentent typiquement les transports de produits déjà fabriqués, qui vont s'imbriquer dans l'inventaire final du produit ou alors des matériaux qui sont réutilisés après recyclage.

A partir de l'évaluation des impacts environnementaux significatifs puis l'identification et la classification des pistes d'améliorations, l'éco-conception offre des solutions « sur mesure », dans le sens où les améliorations possibles sont variées : d'améliorations ponctuelles à la remise en question profonde du produit. Tant que la démarche reste raisonnée, il suffit de diminuer au moins un impact sans en augmenter ni en créer d'autre pour que l'éco-conception soit une perspective justifiée.

2.3.1 Fil conducteur

Il n'existe pas d'outil universel pour l'éco-conception, mais plutôt un *fil conducteur* commun à toutes les démarches. Celui-ci consiste en quatre étapes similaires à celles présentées lors de l'introduction à l'analyse sur cycle de vie. Nous retrouvons en effet une image des quatre étapes d'une analyse sur cycle de vie, l'éco-conception intervenant sous la forme de la recherche d'un optimum sur la conclusion d'une analyse sur cycle de vie :

Objectifs de la démarche - Il s'agit d'améliorer un produit existant ou concevoir un nouveau produit.

Inventaire (partiel ou non) du cycle de vie - Expliciter l'unité fonctionnelle après avoir identifié les étapes du cycle de vie.

Sources d'impacts - Identifier les entrants et sortants et sélectionner ceux qui feront partie de l'étude puis évaluer leurs impacts sur l'environnement.

Pistes d'améliorations - Chercher des paramètres dont dépendent les principaux impacts et proposer des moyens de les réduire.

L'éco-conception offre ainsi des solutions spécifiques qui présentent des améliorations variées d'un produit et une démarche raisonnée, évaluant les impacts environnementaux significatifs, identifiant puis ordonnant les pistes d'améliorations. Il s'agit en effet de choisir pour chaque produit les pistes d'amélioration les plus profitables pour l'environnement en fonction de la situation de l'entreprise concernée et d'organiser cette démarche selon l'importance croissante des points suivants : les impacts les plus significatifs, les centres d'agissement possibles dès maintenant pour l'entreprise et enfin les perspectives d'améliorations programmées pour les gammes de produits futures. Dans cette perspective, nous distinguons deux types de démarche :

La démarche exhaustive - Celle-ci se base sur une évaluation globale, prenant en compte l'ensemble du cycle de vie du produit et l'intégralité des impacts environnementaux à disposition. Il reste ensuite à rechercher quels paramétrages de conception permettent de diminuer l'importance de chaque impact tout en s'assurant que ces pistes d'améliorations n'en aggravent pas d'autre.

La démarche sélective - Cette fois-ci, la recherche des options de conception ne concerne qu'un ou quelques problèmes environnementaux identifiés au préalable (typiquement lors de l'établissement des objectifs d'étude). Il faut cependant rester conscient des autres impacts, au moins pour valider que les optimisations ne nuisent pas aux points non traités ou même n'en créent de nouveau.

Seule la démarche exhaustive repose sur l'utilisation d'une analyse sur cycle de vie complète. Il s'agit d'une méthode d'optimisation qui est extrêmement lourde à mettre en place, que ce soit en termes d'investissement financier, de temps d'exécution et d'interprétation des résultats. Il est plus simple de mettre en œuvre dans un premier temps une démarche sélective éclairée (qui pourra aussi être privilégiée dans le cas de conception de produits nouveaux) puis d'incorporer par la suite des impacts environnementaux supplémentaires.

2.3.2 Méthodes d'investigations

Quelle que soit la démarche d'éco-conception choisie, celle-ci s'appuie sur des méthodes d'investigation qui, au niveau du cycle de vie, peuvent se montrer encore une fois plus ou

moins exhaustive. Il faut bien sûr garder à l'esprit que l'exhaustivité n'est pas forcément gage d'une bonne étude, dans le sens où certains impacts peuvent être clairement négligés sans pour autant diminuer la portée du résultat, mais en gagnant significativement sur les temps d'inventaire et d'interprétation. La définition des objectifs représente ainsi un point critique dans l'éco-conception. Lors de la comparaison de deux produits, il est tout à fait judicieux de se limiter aux seuls points de désaccords entre les deux. Inutile alors d'étudier les phases qui ne présentent pas de différences. Cette remarque peut influencer le choix de la méthode d'investigation des impacts environnementaux du ou des produits éco-conçus.

Trois exemples courants de méthodes d'investigations retenues en amont d'une éco-conception sont explicitées à la Figure 1.13. A la suite de l'établissement de méthodes et pour faciliter l'évaluation de différentes options de conception ou d'amélioration de produits, il a été développé des outils dont l'intérêt principal est la commodité d'emploi. Cette commodité peut parfois amener à une étude très grossière. Il faut donc être prudent lors du choix de la méthode d'évaluation et surtout connaître ses spécifications et ses limites.

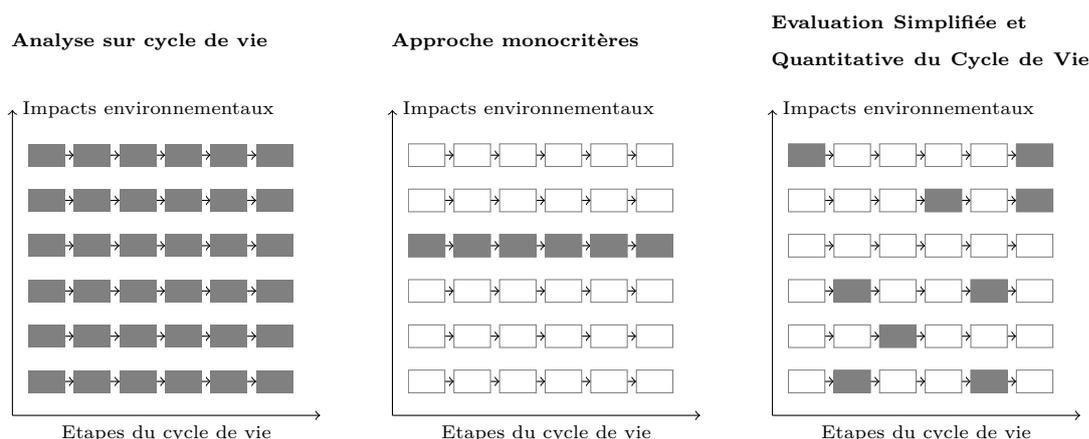


Figure 1.13 – Trois méthodes d'investigations sur cycle de vie en vue d'une éco-conception.

L'analyse sur cycle de vie. Cette méthode, la plus aboutie et la plus complète, propose une évaluation globale et multi-critères des impacts environnementaux. Cette analyse débouche sur une interprétation du bilan sur l'ensemble des flux entrants et sortants qui interagissent entre le système défini et l'extérieur. L'utilisation et la normalisation internationale en ont fait un outil d'aide à la décision performant et reconnu, mais encore assez lourd d'utilisation. Nous avons exploré en première partie ce qu'il faut regrouper afin de mettre en place une telle étude de façon rigoureuse.

Nous retiendrons que cette méthode d'investigation prend en compte tous les impacts sur toutes les étapes du cycle de vie du produit et donne logiquement les résultats les

plus complets, avec comme défaut suffisamment de critères pour que le nombre d'objectifs contradictoires ne donnent qu'une solution d'un trop grand compromis, c'est-à-dire ne possédant plus aucune qualité forte.

Approche mono-critère. Une autre possibilité simplificatrice est de ne sélectionner qu'un seul critère d'impact sur l'ensemble des phases du cycle de vie. En effet, certains secteurs industriels ont fait apparaître des situations particulières telles qu'un impact solitaire se constitue comme d'une influence majeure sur le cycle de vie, que ce soit au niveau de la consommation ou des rejets. Il s'agit par exemple de l'industrie des matières plastiques, qui sont à l'origine du bilan énergétique total [Rug00] du fait que la consommation d'énergie représente un impact écrasant sur le cycle de vie sur la plupart des composés plastiques. Ce constat permet de simplifier la démarche d'éco-conception sans pour autant introduire de distorsion significative des résultats.

Beaucoup moins coûteuse qu'une analyse sur cycle de vie complète, l'approche mono-critère permet ainsi d'accéder à des conclusions plus rapidement et d'effectuer un premier choix comparatif entre plusieurs solutions possibles. Il ne faut toutefois pas perdre de vue d'autres aspects fondamentaux comme l'aptitude de l'objet à remplir sa fonction (commodité d'emploi, longévité, sécurité, etc.), la maturité technologique et la compétitivité économique de la solution examinée et enfin l'acceptabilité sociologique du produit proposé. Inutile de fabriquer un produit à moindre impact environnemental s'il ne se vend pas, au détriment d'un concurrent moins écologique.

Notons que l'approche mono-critère est susceptible de présenter des transferts de pollution lors d'une optimisation non raisonnée et mono-critère, comme présenté à la Figure 1.14. Cela peut apparaître quand cette optimisation porte sur une seule phase du cycle de vie, ou bien sur un seul impact tout au long du cycle de vie. Une approche mono-critère d'éco-conception est uniquement mono-critère du point de vue de l'analyse sur cycle de vie. En effet, libre à nous d'ajouter par la suite à ce critère que nous jugeons comme fondamental d'autres critères de domaines technico-économiques, comme un rendement, un encombrement, un coût financier, etc.

Evaluation simplifiée et qualitative du cycle de vie, ESQV. Enfin, il est possible de ne se préoccuper que de certains impacts sur certaines phases du cycle de vie. Cette investigation s'inscrit dans une logique de « décision sans regrets ». Il s'agit en effet de prendre des décisions en un temps fini (de plus en plus court) de recherche et développement pour améliorer un produit, sans se préoccuper de ce qui aurait pu aboutir si l'étude avait bénéficié de temps supplémentaire. Notons toutefois que l'ESQV ne permet pas de comparer rigoureusement des produits du point de vue de leurs impacts environnementaux, mais propose plutôt des pistes d'améliorations ciblées en vue d'une approche progressive par l'intermédiaire d'une méthode d'investigation sélective. Un exemple en est présenté dans la Table 1.4.

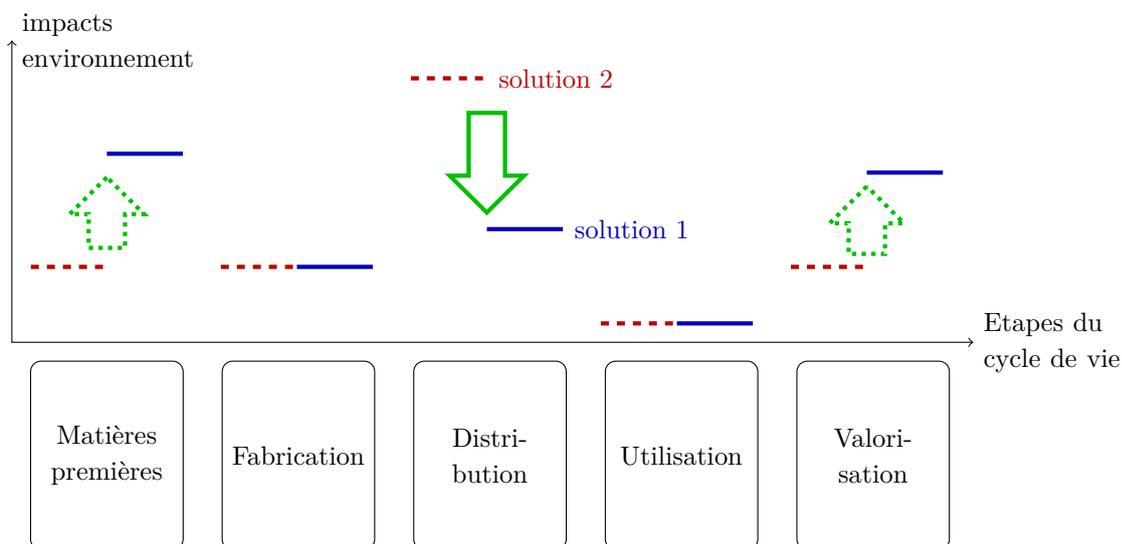


Figure 1.14 – Transfert de pollution pouvant résulter d'une réduction inconsidérée des impacts environnementaux d'une phase du cycle de vie d'un produit.

Table 1.4 – Exemple de grille d'évaluation qualitative du cycle de vie d'un produit. Appréciations : défavorable (!), favorable(+), très favorable (++) , absence de données (?) et sans objet (-) [ADE].

	Extraction matières premières	Production	Distribution	Utilisation	Traitement produit usagé
Pollutions et déchets	?	!	++	-	+
Epuisement des ressources naturelles	!	++	+	!	?
Bruits, odeurs, atteintes à l'esthétique	!	?	+	++	?

Afin de rester basé sur la démarche de « spirale vertueuse » à l'origine de la définition de l'analyse sur cycle de vie, il est nécessaire de raisonner « toutes choses égales par ailleurs » au risque de réaliser de sévères transferts de pollutions. Ce type de méthode est très utilisé actuellement, car elle permet la mise en place de grilles de vérifications simples et ciblées sur les besoins des industriels ou les points sujets aux normes restrictives. Il y a bien entendu des démarches spécifiques à suivre pour respecter la transparence des études, mais nous retiendrons surtout que ce genre d'étude ne permet pas de comparer différents types de produits et reste très qualitative. Il appartient ensuite à des experts d'aller plus loin et de présenter les résultats avec les précautions qui s'imposent.

2.3.3 Les outils à disposition

Nous distinguons les outils utilisés en éco-conception selon qu'ils sont à dominante qualitative ou quantitative. Les « check-lists » et les approches matricielles concernent plutôt de l'éco-dimensionnement en ce sens qu'il n'y a pas invention d'une structure innovante, mais choix parmi des solutions existantes de la moins impactante selon les critères retenus par l'entreprise. D'un autre côté les logiciels d'analyse sur cycle de vie, plus complets mais plus complexes proposent une démarche plus apte à la conception, sans toutefois présenter des facilités exceptionnelles envers l'optimisation multi-critères que nécessite désormais la conception systémique.

Les représentations simples. Celles-ci sont généralement établies pour une catégorie de produit type et prennent en compte des aspects aussi bien qualitatifs que quantitatifs. Elles présentent l'avantage de procurer commodité d'usage (elles ne nécessitent pas de connaissances particulières en matière d'évaluation environnementale) et rapidité pour les utilisateurs. Si tant est que l'élaboration initiale de la liste soit faite de façon correctement adaptée à la catégorie de produits qu'elle concerne et sous le coup de compétences solides en matières d'évaluation environnementales (rigoureusement appuyées sur des méthodes d'investigations permettant la quantification des améliorations environnementales), elles permettent de contrôler si le produit est respectueux de l'environnement en répondant à des questions précises pour chaque phase du cycle de vie. Certaines entreprises ont par exemple développé leur propre liste d'évaluation. Nous pouvons donner comme exemple l'Eco-estimator (EE) de Philips, dont le questionnaire se décline en quatre paragraphes.

1. Vie du produit.
2. Energie et matériaux.
3. Recyclabilité (approche fin de vie).
4. Déchets dangereux.

Chaque question apporte un nombre de points, qui peuvent être un nombre d'années (durée d'utilisation), une quantité (consommation d'énergie), une réponse binaire ou des

appréciations, dont l'ensemble des sous-totaux sont additionnés. Le résultat donne une aide à la réflexion sur de nouvelles directions de conception. Les questions étant très précises, ce type d'outil ne pourra être utilisé que sur des produits déjà existants ou sans grandes révolutions technologiques mais susceptibles d'être améliorés du point de vue de leur impact environnemental. De plus, ce type d'outil est spécifique à un type de produit. Il existe bien d'autres exemples, qui s'intéressent globalement aux mêmes points (consommation d'énergie, variété et compatibilité des matériaux, structure et marquage, présence de matériaux dangereux, durabilité et maintenance, démontage et séparation, service rendu à moindre impact) [BBJ99]. Ce type de listes de contrôle est un procédé simple, mais aussi relativement inefficace.

D'autres méthodes, dites matricielles, consistent en des grilles d'évaluation proposées par différents organismes spécialisés. Il s'agit cette fois-ci de remplir la grille de façon qualitative afin d'identifier les points qui méritent une attention plus détaillée. L'ADEME, ainsi que l'AFNOR, mais aussi des entreprises, comme Motorola proposent de telles grilles, qui sont chacune centrées sur des points d'intérêt spécifiques, comme les matériaux, la toxicité ou l'énergie. Tout comme les liste d'évaluation, ces approches matricielles ne permettent qu'une évaluation faiblement quantitative des diverses catégories d'impacts potentiels d'un produit déjà existant à certaines étapes de son cycle de vie. Les résultats se classent sous forme de larges catégories, allant de « favorable » à « défavorable » en passant par « médian ».

Les représentations plus complètes. Les méthodes présentées ci-dessus sont largement utilisées en interne afin de souligner les premières améliorations possibles pour des produits déjà proposés par l'entreprise concernée. L'éco-conception d'un produit nouveau nécessite des outils complets, basés sur une analyse quantitative, permettant une démarche prospective plutôt que rétrospective. Cela nous amène donc à considérer l'apport significatif des logiciels en termes de contenu de bases de données, ainsi que d'outils de calculs en accord avec les normes et de méthodes d'évaluations des impacts.

Il existe désormais des logiciels pour quasiment tous les besoins, que ce soit au niveau d'une phase du cycle de vie ou au niveau d'un impact. Ces logiciels sont à l'origine spécialisés dans des domaines précis ou plutôt des secteurs industriels. Cependant, la plupart de ces logiciels tendent à se diversifier en élargissant de plus en plus les champs d'investigations de leurs analyses sur cycle de vie. Sans parler de logiciels libres, il en existe toutefois certains proposant gratuitement des extraits de bases de données. Nous pouvons citer dans ce cas le logiciel *Bilan Produit 2008*, distribué par l'ADEME [BP0]. Chaque logiciel propose en plus des bases de données spécifiques des indicateurs environnementaux, certains proposent ensuite des indicateurs de fin de vie (revalorisation des matériaux constitutifs de produit). Les principales bases de données sont rappelées en Annexe B, Table B.4 page 209.

L'utilisation d'un logiciel demeure cependant une certaine simplification de l'analyse sur cycle de vie, car ceux-ci proposent des données génériques. Les bases de données sont fortement moyennées afin de convenir au plus grand nombre d'utilisateurs et surtout de conserver la confidentialité des entreprises qui ont accepté de fournir des données tombant généralement sous le coup du régime de confidentialité industrielle. D'un autre côté, ces logiciels peuvent recueillir des informations techniques sur les composants des produits, comme leur mode d'assemblage par exemple. Ainsi, un affichage automatique peut alerter le conception sur le poids d'une pièce, l'incompatibilité de deux pièces du point de vue du recyclage alors que la conception prévoit de les lier de façon indissociables.

Au final, ces logiciels se montrent assez souples d'utilisation et peu restrictifs quand aux objectifs traitables, mais peuvent s'avérer un peu sommaires pour des études poussées, car ils ne présentent souvent que des comparaisons difficiles à inclure dans une optimisation multi-critères. Il s'agit au final plutôt d'outils d'aide à la conception que d'outils de conception. Ils peuvent toutefois être utilisés dans la conception d'éléments du Génie Electrique [TBB06].

Conclusion

L'analyse du cycle de vie est une méthode d'évaluation systématique des aspects environnementaux d'un système de produits et services à chacune des étapes de leur cycle de vie, standardisée par les séries ISO 14000. Cette méthode d'analyse s'utilise en quatre temps que sont la mise en place des objectifs d'étude, l'inventaire d'impacts (bilan de matière et d'énergie), l'analyse de ces impacts et leur interprétation. Chacune de ces phases comporte son lot de difficultés, surtout liées à la relative émergence de la discipline et concerne le plus souvent des domaines scientifiques distincts, nécessitant donc une grande multi-disciplinarité.

La diversité d'approches de l'analyse du cycle de vie laisse une liberté d'interprétation et d'étude qui va de pair avec une tendance à la complexification ou l'utilisation abusive. Il nous appartient donc de trouver la méthode la plus appropriée à la fonction du produit considéré ainsi qu'à ses connaissances environnementales. Il ne faut pas non plus perdre de vue que la fiabilité des résultats dépend de la transparence des objectifs et du champ d'étude, fixés dès le début de l'analyse. Ces deux points tiennent même une part importante dans les résultats finaux. Il est bien sûr possible de simplifier cette démarche tant que les hypothèses sont justifiées, faisant de cette méthode un levier puissant et polyvalent, dont nous utilisons les résultats pour bâtir une démarche de conception innovante : l'éco-conception.

L'intégration de l'environnement dans la conception des produits, prenant en compte des impacts choisis d'avance, a pour but de réduire ces impacts tout en préservant la qualité d'usage des produits. Cette démarche n'est possible actuellement que par amélio-

ration continue de produits déjà proposés. Intégrer l'analyse sur cycle de vie, tout du moins quelques impacts environnementaux du produit sur l'ensemble de son cycle de vie pour optimiser le dimensionnement d'un produit nouveau, n'est pas encore d'un usage courant dans le domaine du Génie Electrique, mais ne peut que susciter la créativité des concepteurs, ainsi que l'adhésion des consommateurs. Ainsi, les secteurs s'impliquant dans cette mouvance sont de plus en plus nombreux (équipements pour véhicules, plasturgie, équipements électriques et électroniques, bâtiment, emballages en matière plastique, mécanique, les services, etc.) [BS05].

La démarche d'éco-conception ouvre des perspectives encore loin d'être explorées et exploitées, notamment dans le Génie Electrique [MAD⁺08]. Elle nécessite une méthodologie de développement spécifique mobilisant un nombre conséquent de paramètres, de conditions et d'interactions. Le procédé d'éco-conception nécessite encore des appuis, qu'ils soient méthodologiques (mise en place des optimisations) ou numériques (bases de données documentées par exemple concernant les moteurs électriques) ainsi que des choix quand à l'évaluation des impacts environnementaux. Ceci constitue le cadre qui nous permettra d'explorer dans les chapitres suivants d'autres directions de conception à partir des indicateurs proposés dans ce chapitre.

Considérations sur l'éco-conception dans le Génie Electrique

Introduction

La conception optimale de convertisseurs électromagnétiques repose essentiellement sur des critères technico-économiques qui ont pour but par exemple de minimiser la masse ou l'encombrement, de maximiser le rendement en fonctionnement, etc. Ces objectifs sont tout à fait viables dans l'optique d'une démarche industrielle de rentabilisation économique. Cependant, la recherche d'un développement industriel durable, motivée d'une part par la demande de produits à meilleure gestion environnementale et d'autre part par la mise en place d'un système de normes internationales (série des normes ISO 14000 [ISO96]) conduit de plus en plus d'entreprises à consentir une démarche conceptuelle de production à moindres impacts environnementaux. L'espoir de retombées lucratives reste bien sûr la motivation principale des produits vendus comme « éco-conçus » toutefois nous ne pouvons que nous féliciter de l'apparition progressive de réelles visions écologiques à moyen puis long terme dans la conception de composants industriels [NW02] notamment, en ce qui concerne ce mémoire de thèse, dans le domaine du Génie Electrique.

Considérer les impacts environnementaux d'un produit non plus comme contrainte, mais comme objectifs de conception implique une nouvelle définition des critères de concep-

tion. En effet, la réduction effective des impacts environnementaux d'un système nécessite leur prise en compte dès la conception. Ce ou ces critères supplémentaires complexifient un peu plus la conception dans un domaine où les technologies envisageables sont multiples et les applications d'une grande diversité. De plus, l'analyse des impacts environnementaux (complète ou partielle) représente à elle seule un potentiel de complexité non négligeable.

Les composants du Génie Electrique font déjà l'objet d'analyses sur cycle de vie. Ainsi le management environnemental s'étend désormais aux composants électriques de la téléphonie mobile [AAL05] aux batteries électrochimiques [RK02, Ryd01], aux métaux ferreux ou non [HKLM04, Mar06] ainsi qu'à leurs chaînes de production [TK05] ou à des secteurs miniers complets [vB07b]. Les systèmes de stockage [DK04, RS05], de production [BPRB04, RRM99, KTOH04, AM98, Als00] et de conversion d'énergie [TSO99] sont aussi étudiés. Enfin les fabricants du Génie Electrique [TSK06] proposent également des écobilans plus ou moins détaillés de certains de leurs produits [ABB03b] tout comme les grands groupes de l'énergie [LCF09, WMC⁺09, SCH06]. En tant que premiers écobilans, ces analyses sur cycle de vie représentent les fondements des futures études d'éco-conceptions.

Du fait de leur complexité, les systèmes électriques et électrotechniques sont majoritairement conçus sur la base d'un processus d'amélioration continue. L'environnement reste dès lors un critère secondaire d'optimisation intervenant après coup dans la démarche de conception. Il s'agit, dans ces travaux, de placer l'environnement et plus spécifiquement le cycle de vie du composant électrotechnique au centre des préoccupations de conception [TBB06, Tra09, LMM07].

La problématique principale de l'éco-conception consiste à considérer l'ensemble des étapes par lesquelles transite le produit durant sa vie : nous parlons alors de conception sur cycle de vie. La plupart des composants du Génie Electrique ont un fonctionnement qui se présente sous forme de cycles plus ou moins complexes. Ainsi, avant même d'envisager la problématique d'une conception *sur cycle de vie*, nous envisageons une problématique qui lui est intrinsèque, celle d'une conception *sur cycles*. En effet, une optimisation sur cycles présente déjà plusieurs difficultés. Il apparait notamment avec la prise en compte du cycle de fonctionnement la nécessité de simulations temporelles et statistiques, des problèmes de vieillissement, etc. Aux spécificités d'une optimisation sur cycles s'ajoutent celles d'une optimisation sur cycle de vie. La conception sur cycle de vie nécessite ainsi des méthodologies spécifiques dont nous développons ici les principaux points.

1. Diversités d'applications

L'éco-conception est une problématique récente que les entreprises commencent à prendre en compte afin d'en tirer un avantage concurrentiel. Considérer le cycle de vie d'un produit dès sa phase de conception nécessite une organisation spécifique à développer au sein des équipes de conception dans le but d'acquérir les compétences nécessaires.

Il s'agit en effet de construire une cohérence entre le processus de conception et les outils à disposition de ces équipes [Jan00]. Il faut notamment identifier les principaux enjeux que représente une démarche d'éco-conception, rechercher les outils disponibles et modifier la démarche de conception classique afin qu'elle puisse être étendue à des critères environnementaux.

Une des premières démarches à effectuer est d'estimer dans quelles mesures les impacts environnementaux cumulés par le composant durant son cycle de vie influent sur sa conception. Un composant étant conçu pour un service utile donné, c'est par la définition de son utilisation que cette première sélection s'opère. Nous proposons ci-dessous une catégorisation mettant en exergue les principales applications pour lesquelles une méthode d'éco-conception a le potentiel d'être la plus performante.

Ratio de charge brefs ou prolongés - Une première différenciation se fait sur le rapport de la durée de sollicitation de la machine sur sa durée de vie. En effet, à puissance égale, suivant que le ratio entre la durée de fonctionnement et la durée d'inactivité est élevé ou faible, les moteurs présentent des pertes cumulées qui peuvent être importantes ou plus faibles. Ainsi une machine dont les pertes de fonctionnement présentent des impacts environnementaux prépondérants devant ceux des autres phases de son cycle de vie ne nécessite pas une optimisation sur cycle de vie.

Petite ou grande série - Une seconde différenciation se fait sur les volumes de production. Les régimes de standardisation extrêmes limitent les impacts environnementaux de la production. Ainsi les moteurs produits en très grande série sont pratiquement vendus au poids, soulignant la prépondérance des coûts d'extraction des matières premières devant ceux de production (dans ce cas, les coûts environnementaux rejoignent les coûts économiques).

Application fixe ou embarquée - Une troisième différenciation se fait sur les conditions d'utilisation de l'application. En effet, dans le cas d'une application embarquée, la minimisation de la masse ou de l'encombrement prennent une importance critique devant les considérations environnementales. Dans ce cas, il faut de plus différencier les machines de traction des simples accessoires. De fait, la masse du moteur de traction a un impact sur sa consommation, couplage qui n'apparaît pas dans la conception d'accessoires (essuie-glace, ventilation, etc.).

L'importance des critères environnementaux est donc particulièrement liée au service utile fourni par la machine électrique. Ce type de classification est spécifique aux produits consommateurs d'énergie qui ne sont pas passifs vis-à-vis de l'environnement. En effet, la minimisation des impacts environnementaux d'un produit strictement passif lors de son utilisation est plus directement liée à la minimisation de sa masse.

Enfin l'éco-conception d'un moteur ne doit pas faire oublier l'application à laquelle il est destiné. Apparaissent dès lors les étages d'alimentation (convertisseur statique, batteries, etc.) de transmission de la puissance (réducteur, liaisons mécaniques, etc.) et les

fonctions mécaniques de la machine (carter, roulements, etc.). Comme nous allons le voir au Chapitre 4, certaines applications permettent de découpler la conception des parties active du moteur de celle des composants annexes. Il s'agit dans notre cas d'un moteur de grande série de construction modulaire dont chaque élément bénéficie d'une optimisation séparée. Le découplage du composant électrotechnique et de son application n'est naturellement pas tout le temps possible.

2. Moteurs à haut rendements

En France, comme en Europe, les systèmes à moteurs électriques représentent environ les deux tiers de la consommation industrielle d'électricité. En France, cela représente 90 TWh par an à comparer aux 120 TWh consommés annuellement dans l'industrie française, conduisant à l'émission chaque année 37 millions de tonnes de CO₂ [ABB07]. De ce fait, les moteurs électriques peuvent jouer un rôle significatif dans les initiatives de réduction des consommations énergétiques et des émissions de CO₂.

Un programme européen a été lancé sous le nom de Motor Challenge [PMC06] accompagné par l'ADEME en France, pour soutenir l'amélioration de l'efficacité énergétique dans le secteur de l'industrie des systèmes consommateurs d'énergie [PEC05], incluant notamment les systèmes d'entraînement par moteurs électriques. Ce programme, orienté vers l'utilisation performante de l'électricité dans l'industrie, concerne tous les systèmes à moteurs électriques pour lesquels il a été démontré qu'il existe un potentiel significatif d'économies d'énergies. Ce programme évolue à présent vers une harmonisation des méthodes de mesure des rendements afin de comparer plus facilement les moteurs de différents constructeurs [IPP]. Une initiative similaire existe pour les transformateurs de distribution [SEE08]. La répartition des consommations des systèmes motorisés dans l'industrie est proposée à la Figure 2.1 et la part des phases d'installation, d'utilisation et de maintenance typiques à la Figure 2.2.

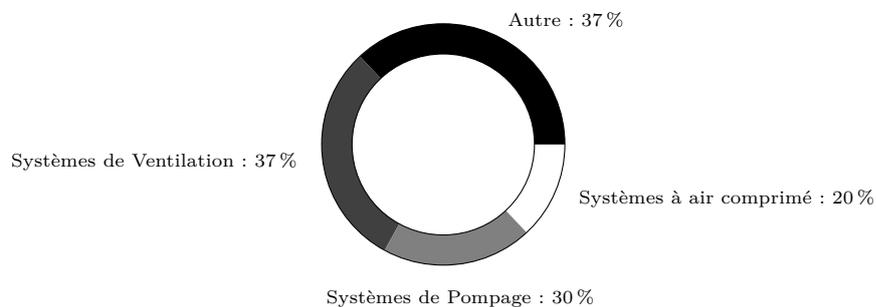


Figure 2.1 – Répartition des consommations des systèmes motorisés dans l'industrie [PMC06].

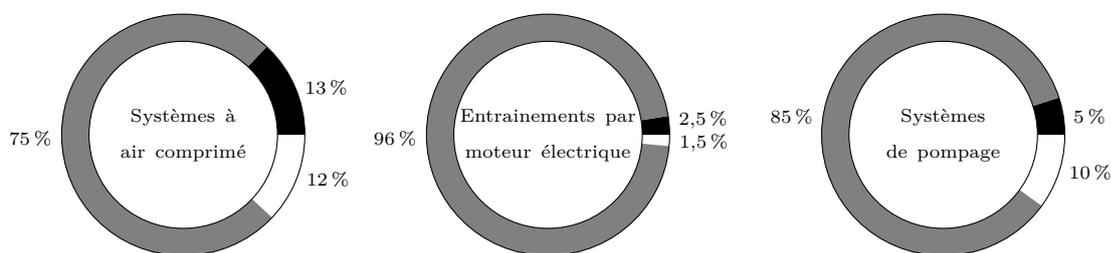


Figure 2.2 – Part énergétique de l'installation (section sombre), de la maintenance (section claire) et de la phase d'utilisation (section grisée) dans la consommations des systèmes motorisés de l'industrie [PMC06].

Des essais réalisés dans l'industrie des procédés indiquent que de nombreux moteurs fonctionnent en moyenne à seulement 50 à 60% de leur charge nominale au détriment de leur rendement (à charge partielle). Adapter la conception du moteur à son cycle de fonctionnement évite de le surdimensionner. En remplaçant des moteurs en sous-charge par des moteurs plus petits et à haut rendement le gain environnemental peut s'avérer significatif. Notons que le surcôt d'achat d'un moteur à haut rendement varie de 5 à 7% pour les moteurs de grosses puissances et 15 à 20% pour ceux de petites puissances [ABB07].

L'amélioration du rendement en fonctionnement passe par l'identification précise des pertes de fonctionnement et des possibilités d'action en vue de leur diminution. Dans l'optique d'une production de moteurs présentant de meilleures performances, il existe des solutions de construction simples pour diminuer ces pertes.

- acier de meilleure qualité et réduction des niveaux d'induction magnétique,
- organes de roulement et garnitures d'étanchéité plus performants,
- sections d'encoche et bobinage optimisés.

Il est de même possible d'améliorer les performances d'une machine en optimisant son refroidissement [YJK02]. Cependant, le surcôt environnemental d'une infrastructure de refroidissement complexe n'est pas intéressant dans le cas d'un système dont l'utilisation se fait sur des régimes thermiques courts.

En raisonnant sur cycle de vie, appliquer uniquement les règles de diminution des pertes de fonctionnement peut entraîner une augmentation des coûts des autres étapes du cycle de vie. D'après les chiffres proposés dans la Table 2.2, les moteurs utilisés en permanence dans les industries concernées par le Motor Challenge peuvent être optimisés sur leur seule phase de fonctionnement. Comme nous allons le voir, notamment au Chapitre 4, ce n'est pas le cas des applications motorisées grand public. La différence se fait ici sur le ratio fonctionnement-inactivité (applications de durées d'usage intermédiaires, comme les lèves-vitres, volets roulants, etc.).

3. Production

Différentes solutions technologiques peuvent être envisagées lors de la conception de machines électriques. Ces choix technologiques ont des impacts environnementaux variés, ayant une action plus spécifiquement sur la phase de production et de recyclage du composant. Notons que l'optimisation sur critères d'éco-conception des procédés de production est envisagée comme un domaine d'optimisation spécifique, que ce soit de manière théorique [HP05] ou à partir d'écobilans [TK05]. En effet, l'étude n'inclut pas le produit conçu. Nous ne traitons pas de cette problématique ici.

Améliorer les performances d'utilisation sans dégrader les performances environnementales peut s'obtenir par l'intermédiaire d'autres caractéristiques physiques. Il est dès lors envisagé l'utilisation de différents matériaux. Ainsi il est possible de changer le cuivre des bobinages par de l'aluminium [Deb82] ou de changer les tôles du circuit magnétique par des composés à base de poudre de fer [CVCF04]. Nous verrons dans la suite du manuscrit qu'il ne s'agit pas d'un changement bénéfique pour les cas d'études proposés dans la seconde partie, comme nous pouvons en avoir l'intuition à partir des données proposées dans la Table 3.1, page 76. De même, l'utilisation d'aimants permanents peut apporter des gains de performances environnementales. Notons qu'à ce jour, nous n'avons pas trouvé de données environnementales sur les différentes technologies d'aimants ni sur les poudres de fer.

4. Recyclage

4.1 Les matériaux

Le recyclage des métaux permet à une large part des métaux déjà produits de rester en service sur des cycles d'usages multiples. Une étude de l'International Council on Mining & Metals [ICM] réalisée en 2006 concernant l'aluminium montre par exemple qu'environ 75 % des 678 millions de tonnes d'aluminium produites dans le monde depuis 1888 est encore utilisée [vB07a].

L'utilisation de matière première de seconde main présente des avantages environnementaux multiples. Tout d'abord, la valeur intrinsèque du métal est préservée, évitant l'extraction de minerai nouveau. En effet, il faut 6,5 tonnes de bauxite pour produire une tonne d'aluminium, 140 tonnes de minerai pour une tonne de cuivre et 1,6 tonne de minerai pour une tonne de fer. De plus, la production de métal secondaire est moins consommatrice d'énergie que la production de métal primaire. La réduction du coût énergétique de production est par exemple de 80 % pour l'aluminium et 60 % pour l'acier dans les données utilisées pour les simulations des chapitres suivants [BP0].

Selon une étude réalisée par le Mining, Minerals and Sustainable Development [MMS] en 2002, la part de cuivre recyclé est de 35 % du cuivre utilisé à l'échelle mondiale. Cette part est de 29 % pour l'aluminium. Pour l'acier, cette valeur est comprise entre 46 et 79 % suivant le pays considéré [vB07a]. Malgré la connaissance de lignes de conduites pour un meilleur taux de recyclage des métaux [Ath07] il existe des limitations à leur recyclage. Tout d'abord les produits complexes ne peuvent être démontés et réutilisés en totalité. En effet, les combinaisons de métaux qui apparaissent lors des récupérations ne sont pas celles présentes dans les composés métalliques obtenus dans les chaînes de production et processus de raffinages classiques. De plus, il existe un temps de latence entre la production de matière première issue de minerai et sa réapparition dans le circuit de recyclage. Ce temps varie suivant l'application dans laquelle le matériau est utilisé, ne permettant pas d'obtenir une estimation précise du tonnage de matières premières de seconde main disponibles sur une longue période, comme elle peut être définie dans le cadre d'une étude d'éco-conception. Nous présentons dans la Table 2.1 les estimations des durées de vie du cuivre, de l'aluminium et du fer dans différentes applications avec leur réapparition dans les filières de recyclage.

Du point de vue français, l'observatoire statistique de la Fédération des Entreprises du Recyclage [FED] propose chaque trimestre une analyse du marché français du recyclage et de la revalorisation. En 2008, le marché de la ferraille représente 3,96 milliard d'euros avec une moyenne de 15 millions de tonnes collectées et produites (dont 10 millions de tonnes commercialisées en France et 4,6 millions de tonnes exportées). Celui des matériaux non ferreux représente 4,06 milliards d'euros avec une moyenne de 1,7 millions de tonnes collectées et produites (dont 1,2 millions de tonnes commercialisées en France et 0,5 millions de tonnes exportées). Dans ces deux secteurs, la différence entre production et collecte est très faible c'est-à-dire qu'il n'y a pas de pertes de matière lors des récupérations.

4.2 Les composants du Génie Electrique

Identifier les points faibles de recyclabilité d'un produit dès sa conception permet l'amélioration de ses performances environnementales. Il existe désormais des méthodes d'indicateurs multicritères témoins de l'adéquation du produit avec le système de valorisation [Hao06]. Différents scénarios de valorisation peuvent être envisagés, y compris des méthodes prospectives. L'application de ces méthodes est pas exemple menée par la combinaison des modélisations de procédés élémentaires lors de la modélisation du système complet [Mat02].

Plusieurs alternatives sont envisageables lorsqu'un convertisseur d'énergie arrive en fin de vie ou présente une défaillance. La solution la plus simple consiste en une réparation, qui peut aller jusqu'à un rebobinage complet du composant. Dans le cas de machines électriques ou transformateurs de très forte puissance notamment, les coûts d'installation et de remplacement sont suffisamment élevés pour justifier de telles pratiques et permettent d'allonger une durée de vie de plusieurs années.

Table 2.1 – *Durée de vie estimée des métaux dans différentes applications avant réapparition dans les filières de recyclage [Nor04].*

Application	durée de vie, années
Cuivre	
Petits moteurs électriques	10-12
Cables	30-40
Bâtiments	60-80
Machines et installations électriques	30
Machines non électriques	15
Transport automobile	8-10
Aluminium	
Bâtiments et constructions	40
Transport aérospatial	30-40
Transport automobile et camions légers	13-20
Transport par camions et bus	20
Transport ferroviaire	30
Biens de consommation durables	12-15
Produits électriques	35
Machines et équipement	20-25
Containers et emballages	0.25-1
Acier	
Transport automobile	5-15
Bâtiments	20-60
Grands industriels	40
Machinerie industrielle lourde	30
Rails	25
Biens de consommations durables	7-15
Boites de conserve	<1

Notons toutefois qu'un moteur rebobiné, bien que présentant une durée de fonctionnement prolongée, accuse une perte de rendement de 1 point pour les puissances supérieures à 30 kW et jusqu'à 2 points pour les moteurs de plus faibles puissances, cette perte de rendement étant moindre pour les moteurs de haute qualité [ABB07]. En effet, le rebobinage (a priori plus artisanal) ne peut pas fournir un bobinage parfaitement identique à l'original (réalisé en chaîne de production). La différence de réalisation, c'est-à-dire les imperfections de bobinage (têtes de bobines un peu plus grandes, insertion des conducteurs dans les encoches, qualité d'imprégnation moins bonne) entraîne des échauffements supplémentaires (et une conduction de la chaleur moins bonne qui entraîne une augmentation de la température) qui sont à l'origine de la baisse de rendement. Plus le moteur est rebobiné avec soin, moins cette baisse de rendement est importante.

Dans une perspective d'éco-conception, il faut garder à l'esprit que les pertes de fonctionnement supplémentaires cumulées à la suite du rebobinage peuvent être supérieures dans certains cas au coût d'une réinstallation complète d'un moteur de remplacement. Dans le cas de machines électriques de petite puissance, le changement de composant reste plus intéressant économiquement que la réparation.

Le recyclage des matériaux constitutifs d'une machine peut présenter des difficultés du fait d'un assemblage complexe. Il existe par exemple des procédés de séparation spécifiques dans un but de réutilisation des matériaux (principalement le cuivre ou l'aluminium) mis en place notamment pour les petits moteurs automobiles, la séparation du bobinage et des tôles ferromagnétique étant effectuée après passage du moteur dans un broyeur [Van06, VV09]. Le désassemblage fait aussi l'objet d'études plus théoriques, présentant l'avantage d'être décrites par l'intermédiaire des mêmes algorithmes que ceux utilisés dans la conception par optimisation multi-objectifs [TS08]. Notons cependant que cette phase est souvent ignorée dans les éco-conceptions ou logiciels d'aide à la conception sur critères environnementaux du fait d'un certain manque de données.

5. Phase de fonctionnement

5.1 Durée de vie

L'éco-conception se base sur la prévision de la phase de fonctionnement incluant une durée de fonctionnement. Cette durée peut se définir de deux façons. D'une part la durée d'usage, qui dépend de critères en partie sociaux (changement du produit par effet de mode) économiques (changement peu cher) et technique (produit hors d'usage dû à une non conformité inhabituelle, une mauvaise utilisation, etc.) et d'autre part la durée de vie qu'il est possible d'estimer en se basant sur des lois de vieillissement (lois probabilistes) fortement liées à la température dans le cas des convertisseurs électromagnétiques.

Planifier le fonctionnement d'un produit sous-entend la connaissance partielle d'au moins une de ces deux durées. D'un point de vue environnemental, il est préférable de se rapprocher d'une utilisation des produits basée sur la durée de vie plutôt que sur la durée d'usage. Citons l'exemple critique du téléphone portable, dont la durée moyenne entre deux renouvellement est descendue en dessous d'un an en 2008.

L'ajout systématique d'études de sensibilités des résultats aux coûts environnementaux constitue une première réponse à ce problème de prévision. D'une part pour cerner les domaines nécessitant les efforts les plus importants et d'autre part pour vérifier que les prévisions effectuées sur la durée de vie du composant sont réalistes. Il est aussi possible d'effectuer une conception basée sur une analyse sur cycle de vie réalisée de façon dynamique pour limiter l'imprécision des projections [Peh06]. Ces calculs incluent des variations des données d'analyse sur cycle de vie pour mieux prévoir l'évolution future des impacts environnementaux du produit durant son cycle de vie. Ainsi, pour chaque année de la phase de fonctionnement (sur laquelle se situent les projections de coûts environnementaux) est effectuée une réévaluation des coûts élémentaires environnementaux. Notons enfin que le choix de l'unité fonctionnelle, discutée au Chapitre 1, section §1.5.1 page 23, influe significativement sur les résultats d'éco-conception, par exemple en étudiant non plus un seul composant mais une population représentative.

5.2 Cycle de fonctionnement

La connaissance du cycle de fonctionnement d'une machine électrique permet une éco-conception spécifique à l'utilisation. Les machines électriques sont habituellement caractérisées sur des « services types » définissant les régimes de fonctionnement normalisés utilisés pour leur conception. Cette définition du service utile (proposée notamment pour un premier choix de dimensionnement des machines dans les documentations constructeur) peut être utilisée pour une simulation temporelle de la phase de fonctionnement.

La définition de services types standardisés doit permettre à terme de définir un composant, une application ou une famille d'application « standards » dans une approche d'analyse sur cycle de vie puis d'éco-conception. A ce sujet, nous vérifions dans les chapitres suivant que le rapport du temps de sollicitation sur la durée totale de fonctionnement peut représenter un premier critère de classification des applications en termes d'objets d'études plus ou moins intéressants pour l'éco-conception.

La connaissance du cycle de fonctionnement précise la difficulté de modélisation du cycle de fonctionnement. En effet, les simulations se faisant en temporel, un cycle de fonctionnement complexe (typiquement celui des moteurs de traction) impacte significativement la simulation sur cycles par rapport à des cycles de fonctionnement plus simples. Dans le cas des cycles de fonctionnement complexes, des méthodes optimisant le contrôle des machines sont mises au point sur une représentation statistique des points de fonctionnement, comme par exemple sur des cycles urbains de véhicules routiers [Per96, WSE06].

Ce domaine d'application prend une importance grandissante avec la généralisation des véhicules hybrides, à piles à combustibles et tout électriques.

5.3 Vitesse variable

La variation de vitesse permet d'optimiser la vitesse des process (par exemple en pompage ou ventilation) avec à la clé notamment de possibles économies d'énergies [BS97]. Cette variation de vitesse s'obtient par le choix de modes de contrôles appropriés.

Le contrôle des machines dans le but d'augmenter leur rendement en fonctionnement est également le sujet de nombreux travaux [GJR04, KM96] permettant une réduction effective des pertes de fonctionnement. Il est ainsi possible d'envisager l'intégration dès la conception d'un mode de contrôle dont l'optimisation vise à minimiser un critère comme l'énergie des pertes non pas sur la seule phase de fonctionnement mais sur cycle de vie. Ce type d'étude nécessite cependant une connaissance suffisante des impacts environnementaux des composants des convertisseurs statiques et leur dimensionnement au même titre que celui des convertisseurs électromécaniques.

6. Vieillessement

Le vieillissement est une estimation temporelle du taux de défaillance de la machine électrique. La bonne connaissance du vieillissement d'une machine électrique permet de mener une recherche de la durée de fonctionnement optimale, en prenant en compte le vieillissement, les maintenances et les remplacements de sous-composants. Outre la qualité, la durée de vie ou la masse optimale, la gestion du cycle de vie souligne ainsi l'importance de la fiabilité et de la disponibilité du moteur. Deux sources de défaillances importantes des machines électriques concernent les roulements et l'isolation du bobinage, la température de fonctionnement du moteur et les variations de tension ayant le plus fort impact sur la durée de vie de ces composants.

Pour optimiser la fiabilité des moteurs, les organes de roulement doivent être adaptés à la charge et à la vitesse, disposer d'un jeu interne et une graisse adaptés à la température de fonctionnement (une baisse de 10 à 15 °C de la température de fonctionnement peut doubler la durée de vie de la graisse des roulements [ABB07]), être relubrifiables si un service de maintenance interne existe ou graissés à vie dans le cas contraire. L'échauffement des bobinages affecte également leur durée de vie. Dans ce cas, c'est l'isolant des fils de cuivre qui se dégrade aux hautes températures, une élévation de six degrés de la température de fonctionnement divisant environ par deux la durée de vie du bobinage. Un autre facteur est la tension maximale. Les bobinages sont prévus en général pour supporter une

tension d'environ 1200 à 1400 V lorsqu'ils sont alimentés par un variateur de vitesse où les fronts raides de commutation génèrent des pics de tension élevés.

Maintenance et défaillances ont aussi des coûts environnementaux indirects qu'il faut prendre en compte en plus des pertes lors de la phase de fonctionnement. Ces données ne sont pas aisément prévisibles sur une durée totale de fonctionnement lorsque le produit est encore au stade de concept. Entrent à nouveau en jeu dans ce type de modélisations les notions d'études probabilistes.

6.1 Vieillessement thermique

Le vieillissement des isolants croît avec la température qui affecte leurs propriétés diélectriques. La température maximale des isolants varie naturellement en fonction de la température ambiante et ce, même si le composant est soumis à une charge constante. Des agents extérieurs influent aussi sur leur vieillissement, comme l'oxygène ou l'humidité de l'air ambiant ou même les réactions chimiques des matériaux ambiants (oxydation du cuivre, décomposition du papier) [CM90].

Notons que ces calculs de vieillissement s'appliquent aux isolants aussi bien suite à des contraintes thermiques que des contraintes électriques ou des contraintes mécaniques. Lorsque plusieurs contraintes différentes s'exercent sur les isolants, les modèles de vieillissement restent valables, multipliant les différents effets entre eux [MS93]. Nous nous limitons ici à un vieillissement thermique afin de poser le problème.

6.1.1 Vieillessement dû au régime thermique permanent

Le taux de défaillance des isolants s'exprime sous la forme d'une fonction exponentielle qui dépend de l'écart entre la température des isolants θ_i et une température de fonctionnement de référence θ_{ref} . Le Conseil International des Grands Réseaux Electriques au début des années 1980 [CIG] a proposé une règle de vieillissement pour les isolants classiques. Dans ce cadre, une élévation de six degrés réduit de moitié la durée de vie de l'isolant selon l'équation (2.1). Notons que cette loi de vieillissement n'est en fait que la déclinaison d'une loi plus générale, la loi d'Arrhénius, définissant une vitesse statistique des réactions chimiques dépendant de l'énergie d'activation des matériaux concernés. L'espérance de vie de l'isolant τ_i s'écrit à partir de la durée de vie de référence de l'isolant τ_{ref} . Cette durée de vie (prise de 20 000 heures au Chapitre 3, section §3.3 page 100) est probabiliste et rejoint la notion de Mean Time To Failure (MTTF).

$$\tau_i = \tau_{ref} \cdot 2^{\frac{\theta_{ref} - \theta_i}{6}} \quad (2.1)$$

L'exploitation en surcharge ou en sous-charge d'un composant électrotechnique peut donc accélérer ou ralentir le vieillissement de ses isolants. Les surchauffes ne peuvent donc être acceptées que sur des durées très courtes si le dimensionnement n'a pas été prévu en conséquence. Il s'agit en effet de faire tenir sur une durée totale d'utilisation identique une durée de fonctionnement réelle plus faible.

6.1.2 Vieillessement dû aux régimes thermiques transitoires

Dans des conditions d'utilisation variables est introduit un coefficient de dégradation de l'isolant dont l'intégration permet d'estimer une espérance de vie moyenne en régime thermique transitoire. A partir d'une dégradation initiale (que nous supposons nulle) et d'un coefficient de dégradation élémentaire sur une durée d'utilisation élémentaire, définie comme le rapport de τ_i sur τ_{ref} la durée de vie moyenne de l'isolant est ensuite estimée sur le profil de température donné par intégration sur la durée totale d'utilisation [FB07].

$$\tau_i' = \int_{fct} 2^{\frac{\theta_{ref} - \theta_i(t)}{6}} dt \quad (2.2)$$

6.2 Vieillessement mécanique

La charge pour laquelle le temps de vie nominal du roulement atteint un million de tours est appelée charge dynamique de référence C_0 , il s'agit d'une donnée constructeur. La durée de vie d'un roulement est le nombre de révolutions (ou le nombre d'heures de fonctionnement à vitesse de rotation donnée) accomplis par le roulement avant de présenter les premiers signes de fatigue mécanique. Dans le cas d'une charge et d'une vitesse de rotation variable, la détermination de la durée de vie nominale τ_r d'un roulement à billes s'exprime en définissant \bar{N} la vitesse de rotation moyenne (en tours par minute) et \bar{F} la charge moyenne dynamique :

$$\tau_r = \frac{10^6}{60\bar{N}} \left(\frac{C_0}{\bar{F}} \right)^3 \quad (2.3a)$$

avec

$$\bar{N} = N_1 \Delta t_1 + N_2 \Delta t_2 + \dots + N_i \Delta t_i \quad (2.3b)$$

et

$$\bar{F} = \sqrt[3]{F_1^3 \frac{N_1}{\bar{N}} + F_2^3 \frac{N_2}{\bar{N}} + \dots + F_i^3 \frac{N_i}{\bar{N}}} \quad (2.3c)$$

Il est possible de pondérer cette durée de vie par des coefficients prenant en compte des spécificités d'utilisation, notamment par l'intermédiaire d'un facteur de probabilité de défaut, d'un facteur prenant en compte la température du roulement et d'un facteur modélisant les conditions d'utilisations (température nominale, qualité du lubrifiant, température, vitesse de rotation, etc.). Notons cependant que sous conditions « normales » (présence d'un film de lubrification, pas de pollution, positionnement correct, etc.) tous ces facteurs sont unitaires. Le facteur principal de vieillissement est, dans le cas des machines électriques, la charge axiale qui peut, si elle est trop importante, diminuer significativement la durée de vie des roulements. La définition des grandeurs temporelles est proposée à la Figure 2.3.

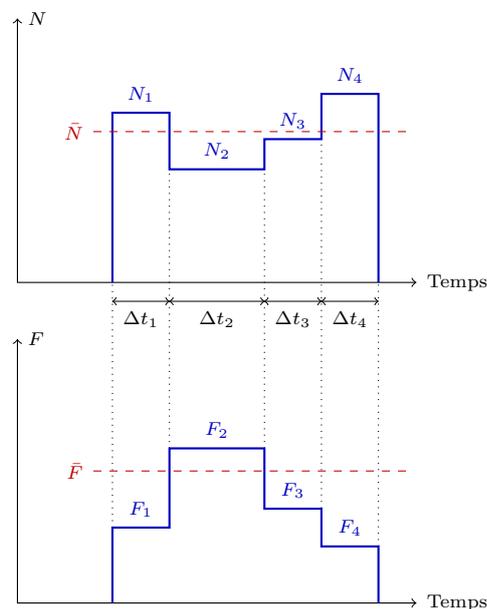


Figure 2.3 – Cycle d'utilisation à charge et vitesse variable pour le calcul de la durée de vie des roulements [LS98].

7. Introduction aux chapitres à venir

Le but général de ce travail de thèse est la mise en place d'une méthodologie d'éco-conception dans le génie électrique, dont nous privilégierons le domaine des convertisseurs électromécaniques. En effet, ce domaine est un sujet d'études de modélisations et d'expérimentations importantes au sein de l'équipe SETE du laboratoire SATIE, proposant ainsi une expérience solide et des compétences familières aux machines électriques, terrain naturellement favorable à une première expérience en éco-conception.

La conception d'un produit nouveau nécessite l'introduction d'une structure innovante et physiquement viable. L'existence préalable de la structure fait la différence entre conception et dimensionnement. Ainsi, le dimensionnement est une sous-partie de la conception qui ne redéfinit que partiellement un concept ou une idée déjà connue [Ahm06]. Les travaux de cette thèse, bien que proposés sous le terme d'éco-conception, font plutôt référence à de l'éco-dimensionnement. La méthodologie d'éco-conception étant relativement novatrice dans le domaine des machines électriques, nous jugeons préférable de limiter nos travaux à des exemples de convertisseurs électromagnétiques plus ou moins simples mais déjà connus. Ces considérations évitent, lors de l'analyse des résultats d'optimisation, de faire la part entre l'impact des critères d'analyse sur cycle de vie et les propriétés inconnues d'une structure nouvelle. Rappelons à toutes fins utiles que l'objet de ces travaux n'est pas l'éco-conception de machines électriques spécifiques, mais une étude exploratoire sur les conditions favorables ou défavorables à l'utilisation de l'analyse sur cycle de vie dès la conception d'un convertisseur électromagnétiques. Nos travaux se basent donc sur des machines électriques dont la géométrie (répartition des bobinages, disposition des pièces ferromagnétiques, etc.) ainsi que les conditions d'utilisation (raccordement au réseau, type d'alimentation, puissance utile, etc.) sont formellement connues et caractérisées par un ensemble de paramètres donnés.

7.1 Objets d'études

Nous utilisons dans les chapitres suivants des critères environnementaux dans la conception de deux composants électrotechniques typiques. Le premier objet d'étude est un transformateur monophasé « minimal » (circuit magnétique EI) alimenté à tension et fréquence fixes sur un cycle de fonctionnement également simplifié. Ceci permet une modélisation rapide et des temps de simulation réduits. L'étude des résultats d'optimisation oriente nos travaux méthodologiques vers une catégorie de machines électriques appropriée à l'éco-conception en termes d'identification des propriétés et d'action des critères environnementaux sur le dimensionnement.

Le second objet d'étude est une machine asynchrone monophasée réelle à condensateur permanent et alimentation fixe, sans convertisseur statique. Cette machine provient d'une collaboration avec un fabricant et distributeur de moteurs domotiques, la société SOMFY [SOM] par l'intermédiaire de leur service Technique et Expertise. Ces moteurs présentent comme particularité des fonctionnements brefs (quelques minutes par jour) diminuant l'importance de la phase d'utilisation dans le cycle de vie du moteur donc en faisant de bons candidats à une conception sur cycle de vie.

Le dernier objet d'étude est plus théorique : il s'agit toujours d'une machine asynchrone, mais cette fois-ci triphasée dont nous libérons la contrainte d'alimentation. A géométrie donnée, les paramètres d'alimentation doivent être optimisés pour chaque cycle de fonctionnement considérés. Cette modélisation, plus complexe, a pour but d'aborder la problématique de l'optimisation simultanée des paramètres d'alimentation et de géo-

métrie de la machine. A termes, il faudra considérer les impacts environnementaux du convertisseur statique, sachant qu'à l'heure actuelle nous ne disposons pas des données environnementales nécessaires.

7.2 Définition du champ d'étude

7.2.1 Impacts environnementaux

Les impacts d'un produit sur l'environnement sont multiples, imbriqués de manière complexes et suffisamment diversifiés pour afficher des comportements contradictoires au sein d'optimisations multi-objectifs. Par environnement, nous entendons tout ce qui n'est pas le convertisseur électrique et qui lui est extérieur : celui-ci représente ainsi le seul objet de notre étude.

Il nous manque cependant des données environnementales concernant l'assemblage et le démontage des composants modélisés. En effet, les bases de données se montrent encore relativement évasives à ce sujet. L'obtention de ces données reste difficile car représentant un travail qualifié, complexe et restreint par des problèmes de confidentialité. Ainsi les données utilisées ne prennent pas en compte l'intégralité du cycle de vie mais seulement les phases suivantes :

1. Extraction et production des matières premières des parties actives.
2. Transport des matériaux constitutifs des parties actives.
3. Pertes en fonctionnement.

Notons que les coûts environnementaux sont calculés sur la base des parties actives du composant final. En effet, la fabrication des sous ensembles (bobinage, circuit magnétique, etc.) engendre des chutes de matière première. Celles-ci ne sont pas prises en compte dans les estimations des impacts environnementaux. Ces chutes sont de toute façon la plupart du temps recyclées.

Assemblage - Ainsi que nous l'avons évoqué, nous n'incluons pas le processus de production dans les paramètres d'optimisation du composant. Notre étude d'éco-conception, centrée sur un seul produit, se positionne de façon transversale vis-à-vis des sites de production : le composant voyage d'un site à l'autre au cours de son cycle de vie.

Recyclage - La fin de vie est difficilement quantifiable sous forme de coûts environnementaux pour une masse de matériau donnée si bien que nous ne prenons pas en compte le recyclage sous cette forme. Par contre, le recyclage des matériaux peut être introduit dès la phase de production des matières premières, c'est-à-dire en prévoyant un pourcentage de la masse comme provenant de matériaux de seconde main

plutôt que de première main, supprimant ainsi une grande partie du coût environnemental de production et la totalité du coût environnemental d'extraction. Le fait d'inclure dans le calcul de masse de matériaux de production d'un composant sous la forme d'un pourcentage de matière recyclée provenant d'un composant identique arrivé en fin de vie n'est pas nouveau [Nis95]. Il est même à l'origine du terme de cycle dans l'appellation « cycle de vie ».

Energie globale sur cycle de vie. L'un des aspects environnementaux significatifs des produits électriques et électroniques étant la consommation d'énergie [AFN98], nous nous concentrons dans un premier temps sur le seul critère d'énergie globale sur cycle de vie, ainsi qu'à la seule fonction de convertisseur électromagnétique, découplée de son environnement fonctionnel. Cela revient à minimiser une fonction que nous allons définir comme la somme de toutes les énergies consommées sur le cycle de vie du convertisseur. Cette somme peut être algébrique si par exemple l'élimination des composants produit de l'énergie. Notons que ce calcul d'énergie est ramené en énergie primaire. En effet, les bases de données d'inventaires d'analyse sur cycle de vie sont exprimées en énergie primaire, ce qui nous oblige à remonter du calcul des pertes de fonctionnements à l'énergie primaire en utilisant le mix énergétique du pays de production du composant électrotechnique. Nous choisissons par défaut la France et comparons dans les chapitres suivants avec le mix énergétique européen. Notons que dans tous les calculs présentés ici, les pertes mécaniques ne seront pas considérées.

Le choix de l'énergie est immédiat du fait d'un travail dans le domaine du Génie Electrique. En effet, nous pensons que cet impact environnemental constitue un des impacts majeurs des composants électrotechniques sur l'environnement. Plus spécifiquement qu'une étude d'éco-conception, ce premier impact environnemental nous permet ainsi d'introduire le rendement énergétique sur cycle de vie. En outre la méthodologie sera parfaitement applicable à d'autres critères à partir du moment où les bases de données sont disponibles.

Potentiel de réchauffement climatique. Ce critère est d'une actualité forte, que ce soit dans l'opinion publique ou les normalisations, comme en témoigne la mise en place d'une méthode d'analyse sur cycle de vie mono-critère spécifique, la méthode « bilan carbone » développée par l'ADEME [ADE07]. Son choix est donc dicté par l'intérêt qu'il suscite, notamment au sein des industries de grande production. D'un point de vue méthodologique, l'ajout de ce critère n'apporte pas de déficit supplémentaire par rapport à l'énergie globale sur cycle de vie. Nous utiliserons ainsi le critère de potentiel de réchauffement global uniquement dans le cadre de la machine asynchrone monophasée, du fait d'une demande industrielle en ce sens au cours de notre collaboration avec SOMFY.

7.2.2 Service utile

Comme nous l'avons souligné précédemment, l'optimisation de l'énergie globale sur cycle de vie d'un composant électrotechnique prend nécessairement en compte la durée et le type d'utilisation qui en est fait : il s'agit après tout du service que le composant doit rendre. Ce service représente une contrainte plutôt qu'un objectif en termes d'optimisation en ce sens que l'utilisation est strictement imposée et ne peut être sujet à un paramétrage bien qu'il s'agisse là d'un puissant moyen de diminuer les impacts environnementaux dans le cas des composants sujets à des pertes de fonctionnement significatives.

Etant convaincu que la diminution des impacts environnementaux des activités humaines passe non seulement par des produits conçus selon des critères plus environnementaux mais aussi par une véritable implication des utilisateurs dans leur mode de vie (en ce qui nous concerne, leur mode de consommation) nous étudions la sensibilité des résultats d'optimisation au service rendu par le convertisseur d'énergie. Ceci permet de constater si un petit effort de l'utilisateur n'aurait pas un impact significatif sur le dimensionnement, rendant dérisoires les améliorations apportées par une éco-conception dont les seuls paramètres concernent la géométrie du convertisseur, le choix des matériaux, les process, etc.

Afin de simplifier les simulations ainsi que l'analyse des résultats, nous travaillons sur des modes d'utilisation définis sous forme de cycles à l'échelle de la journée et répétés chaque jour sur la durée d'utilisation totale du composant. Nous proposons dans notre étude plusieurs durées de cycles de fonctionnement jouant d'une part sur les pertes de fonctionnement mais aussi sur la modélisation thermique. En effet, une utilisation très ponctuelle ne donne que peu de pertes cumulées sur la durée totale d'utilisation, mais nécessite une modélisation thermique en régime transitoire, le composant n'ayant alors pas le temps d'atteindre son régime permanent thermique.

7.3 Modélisations et simulations

7.3.1 Modélisation thermique

L'échauffement des machines électriques représente une contrainte importante lors de leur conception. Une limitation en température peut effectivement jouer sur plusieurs aspects du dimensionnement de la machine, comme sa durée de vie ou encore la qualité de ses services. Lors de son fonctionnement, le composant électrotechnique est le siège de pertes. Nous ne considérons que celles localisées dans les éléments actifs :

- les variations de l'induction dans les tôles du circuit magnétique créent des pertes fer,

- le composant consomme un courant qui va créer un échauffement des bobinages en les parcourant. Il s'agit des pertes Joule.

Nous ne travaillerons que sur des composants électrotechniques disposant d'un mode de refroidissement par air. Cette limitation nous évite toute prise en compte des coûts supplémentaires ainsi que des modélisations de refroidissements plus complexes qui nous écarteraient des objectifs exploratoires de ces travaux.

Régime thermique permanent. Le fait d'utiliser un modèle thermique en régime permanent permet d'assimiler la durée totale d'utilisation à un ensemble de périodes de fonctionnement indépendantes cumulées pour donner un temps d'utilisation équivalent à puissance nominale. Cette durée, qui est fixée avant de lancer l'optimisation des dimensions, permet d'intégrer les puissances non utiles consommées durant la phase de fonctionnement (sous forme de pertes) sans calcul temporel, autrement dit de façon instantanée à l'échelle du reste de la simulation. L'hypothèse d'un régime quasi-permanent thermique ne sera valable que dans les cas d'utilisations prolongées du composant électrotechnique devant ses constantes de temps thermiques. Son intérêt principal est la rapidité avec laquelle les modèles bénéficiant de cette hypothèse sont simulés, nous permettant de lancer un grand nombre d'optimisations.

Régime thermique transitoire. Des durées d'utilisation courtes devant les constantes de temps thermiques rendent une modélisation en régime thermique transitoire obligatoire. Ce type de sollicitations s'avèrent constituer un cas de figure particulièrement propice à l'application d'un critère d'efficacité énergétique sur cycle de vie en ce sens que la consommation d'énergie pour les pertes de fonctionnement n'est alors pas prépondérante devant les autres coûts énergétiques sur cycle de vie.

Notons que nous ne prenons pas en compte les couplages thermiques, c'est-à-dire que la température à un moment donné n'influence pas les propriétés des matériaux du point de calcul suivant. Nous nous plaçons dès lors dans le pire des cas en calculant les valeurs des données physiques pour une température constante, par exemple la température maximale admissible par les matériaux.

7.3.2 Algorithme d'optimisation

La formalisation du problème présenté par la conception de systèmes complexes est devenu un sujet de travail désormais classique dans le domaine du Génie Electrique [KNM93]. A partir d'un cahier des charges, de contraintes structurelles et d'un modèle dimensionnant une procédure d'optimisation non linéaire nous propose des dimensions optimales en conformité avec les besoins de conception. Ainsi plusieurs objectifs de conception peuvent

être simultanément optimisés sous la forme d'un problème multi-critères proposant un ensemble de solutions optimales. L'impact sur la solution retenue n'est plus effectué pendant l'optimisation, mais lors du choix final, par le concepteur, de privilégier un des objectifs (solutions extrêmes sur les fronts) ou aucun (solution intermédiaire).

L'éco-conception est basée par principe sur plusieurs critères environnementaux, qui peuvent être contradictoires. Elle requiert naturellement un outil d'optimisation multi-critère [AC99]. En effet, une représentation des résultats d'optimisation selon des fronts ou des surfaces optimales permet un choix en tout état de cause d'une part et une comparaison aisée de différentes optimisations d'autre part. Ce second point va être particulièrement utilisé dans les chapitres suivants.

L'optimisation des paramètres descriptifs des composants électrotechniques considérés se fait selon deux ou trois critères (énergie, masse et potentiel de réchauffement climatique) et sous les différentes contraintes spécifiques aux convertisseurs d'énergie électromagnétiques (thermique et induction). Nous choisissons d'effectuer ces optimisations par l'intermédiaire d'un algorithme évolutionnaire. Il s'agit d'une suite de générations consécutives reproduisant les principes de l'évolution naturelle en agissant sur une population d'individus à l'aide d'opérateurs de deux types [Reg03] :

1. Des opérateurs qui transposent les mécanismes de sélection naturelle en orientant la recherche vers les solutions les mieux adaptées.
2. Des opérateurs d'évolution dont le rôle est de favoriser l'émergence de nouvelles solutions.

Ce type de méthode d'optimisation permet de représenter l'ensemble des solutions optimales sous forme d'un front de Pareto multicritères plutôt qu'un unique résultat. Elle offre ainsi une possibilité de choix a posteriori à partir d'un ensemble de solutions. Cette représentation est particulièrement adaptée à l'étude de l'influence des critères d'optimisation sur la répartition des solutions. En effet, une comparaison des fronts de solutions Pareto-optimales, dans l'hypothèse où les solutions sont identiquement optimales dans les calculs évolutionnaires, permet indirectement de comparer les critères de conception et en l'occurrence leur action sur le dimensionnement du composant électrotechnique.

L'algorithme principal sélectionné pour conduire nos optimisations est nommé NSGA II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) [Deb01], un algorithme d'optimisation évolutionnaire. Il présente l'avantage d'une optimisation multi-objectifs et multicritères dont l'affichage final propose une distribution des solutions Pareto-optimales correctement réparties entre les solutions extrêmes si le nombre de générations et d'individus est suffisant. Nous utilisons aussi un deuxième algorithme évolutionnaire basé sur la méthode des essais particuliers, développé au sein de l'équipe SETE du SATIE et ne faisant pas encore l'objet d'une publication. Dans les problèmes simulés ici, ce second algorithme présente l'avantage d'atteindre des ensembles de solutions proches de ceux obtenus avec le NSGA II en moins de générations et avec une répartition des solutions dans l'espace des paramètres

plus régulière. Ces deux algorithmes restent des outils au service de l'éco-conception, nous ne les comparons pas dans ce mémoire.

Conclusion

Lors d'un projet de conception de composant électrotechnique, un certain nombre de caractéristiques sont fixées par l'utilisateur en fonction des conditions de service prévues. A partir de ces données qui constituent le cahier des charges, il est possible de déterminer un grand nombre de variantes répondant naturellement à ces caractéristiques mais ayant une masse, un encombrement, un coût et des pertes variables. Par coût, il est entendu généralement coût financier. Ce mémoire de thèse s'attache à étendre cette notion aux coûts environnementaux, nous pouvons aussi parler d'une économie environnementale.

Les critères retenus pour la conception d'un produit du Génie Electrique sont habituellement dictés par l'application à laquelle il est destiné. Il s'agira par exemple de l'encombrement ou de la masse dans le cas d'applications embarquées, du rendement pour des applications de forte puissance et de sollicitations de longues durées, etc. Tous ces critères de conception ont pour points communs de se focaliser sur le service utile ou sur des contraintes spécifiques d'utilisation et ne prennent pas directement en compte les impacts environnementaux du produit conçu.

Considérer les impacts environnementaux d'un produit non plus comme conséquence à posteriori, mais comme objectifs de conception permet d'anticiper des normes dont les exigences vont s'accroître et de concevoir des produits plus respectueux de l'environnement. La réduction des impacts environnementaux d'un système constitue un problème multicritères complexe qui nécessite de considérer l'ensemble de son cycle de vie, afin de limiter les transferts de pollution d'une phase à une autre et donc de développer des méthodologies spécifiques.

Les objectifs de nos travaux sont ainsi méthodologiques et plus qualitatifs que quantitatifs. Les approximations utilisées se justifient par une simplification de la modélisation en vue de ne garder que les caractéristiques propres à l'introduction de critères environnementaux dans la conception. Les chapitres suivants vont présenter l'application de critères sur cycle de vie à un premier exemple de transformateur simplifié, une application industrielle spécifique, produite et commercialisée puis un exemple de machine asynchrone dont l'alimentation est paramétrée et optimisée au même titre que sa définition géométrique.

Deuxième partie

**Application à des composants
du Génie Electrique**

Transformateur monophasé à alimentation fixe

Introduction

Cet exemple de transformateur représente la première étape du travail méthodologique de conception sur cycle de vie entrepris dans ce mémoire de thèse. Celui-ci présente l'avantage d'être un composant électrotechnique classique dont les propriétés sont similaires à celles des machines électriques. Il s'agit d'un transformateur monophasé alimenté sous tension et fréquence fixes, permettant une modélisation rapide et des temps de simulation réduits. Ce choix nous évite de plus la prise en compte des problèmes de tenue mécanique induits par la rotation d'une partie mobile afin de se concentrer sur une structure ne comportant que peu de matériaux et définie avec un nombre de paramètres réduit, l'analyse sur cycle de vie nécessitant des simulations temporelles gourmandes en temps de calcul. Il est dès lors possible de focaliser notre attention sur le principe d'éco-conception plutôt que sur un travail de modélisation dont la précision n'est pas l'objet de ces travaux. Il est d'ailleurs possible de faire évoluer la précision de la modélisation en la complexifiant par l'ajout de paramètres physiques et géométriques sans changer le principe de la démarche proposée ici. Nous nous concentrons en outre dans ce chapitre sur un seul critère : l'énergie globale sur cycle de vie, introduisant ainsi la notion de *rendement énergétique sur cycle de vie*.

1. Modélisation du transformateur

1.1 Mise en place de l'étude

1.1.1 Hypothèses de travail

Nous ne considérons dans cette modélisation que les parties actives du convertisseur électromagnétique : le bobinage (primaire et secondaire) et les tôles du circuit magnétique. Afin de simplifier l'étude et l'analyse des résultats, nous travaillerons de plus à taux de remplissage des espaces bobinables ainsi qu'à coefficient de foisonnement de l'empilement des tôles constants.

Nous travaillons sur la base d'un transformateur parfait au premier harmonique. Nous négligeons les chutes de tensions dues à la résistance des bobinages, nous ne considérons pas la puissance réactive de la charge, ni le courant magnétisant (important dans le cas d'un fonctionnement en vieille). Tous les calculs sont effectués dans l'hypothèse d'un fonctionnement linéaire. L'induction magnétique dans le circuit magnétique, estimée dans le noyau central du transformateur, est limitée à une valeur maximale par une contrainte d'inégalité dans l'optimisation.

Le régime permanent électrique est considéré comme toujours atteint dans ces travaux, les constantes de temps mises en jeu nous permettant de nous placer dans les conditions d'application de l'hypothèse de régime permanent électrique, même si l'interaction des différentes natures de régimes transitoires peut mener à des résultats dont le dimensionnement serait au final sensible, par exemple une répétition de régimes transitoires de mise sous tensions électriques dont les effets seraient significatifs. La simulation des cycles de fonctionnement se fait à l'échelle d'une journée.

Nous ne modélisons pas le couplage thermique-électrique. Les grandeurs physiques utilisés dans ces calculs sont donc estimées dans le pire des cas, à la température maximale admissible par les bobinages. Notons toutefois que ce couplage thermique peut conduire à une variation significative de l'estimation des pertes lorsque la température est amenée à varier beaucoup (la variation de résistivité du cuivre en fonction de la température est d'environ 0,4 % par °C).

1.1.2 Paramètres descriptifs du transformateur

Le transformateur considéré possède une structure magnétique de type EI à enroulements concentriques [EB05]. Sa géométrie, présentée à la Figure 3.1, est décrite par l'intermédiaire de trois paramètres : h_b pour la hauteur de la fenêtre de bobinage, e_n pour

l'épaisseur du noyau central et L_a pour la longueur active du paquet de tôles. Nous avons délibérément séparé le paramétrage de l'épaisseur du noyau central et de la longueur active du paquet de tôles afin de permettre à l'algorithme d'optimisation d'avoir une action séparée sur les données environnementales du cuivre des bobinages et du fer du circuit magnétique.

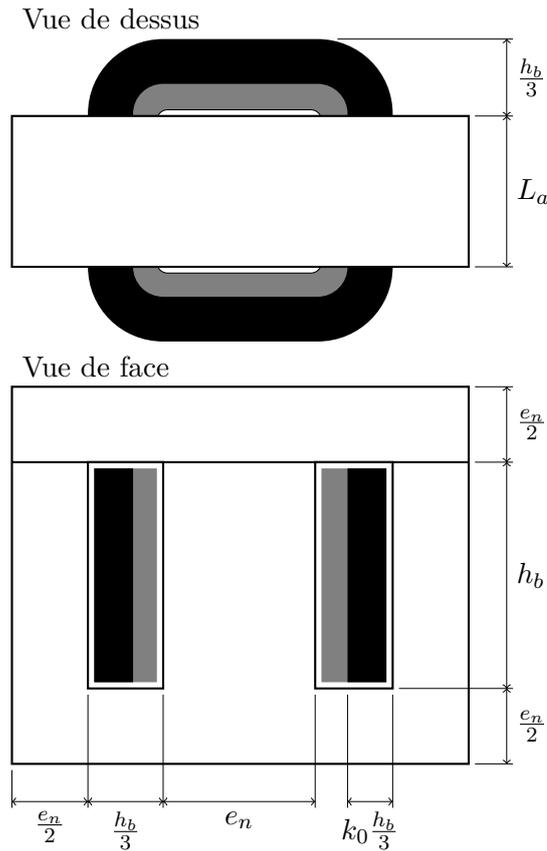


Figure 3.1 – Représentation géométrique du modèle de transformateur monophasé.

Les enroulements primaires et secondaires sont respectivement constitués de N_1 et N_2 spires bobinées autour du noyau central. N_1 est un paramètre d'optimisation alors que N_2 est déduit du rapport de transformation. La répartition de la surface des fenêtres de bobinage entre les deux enroulements fait apparaître un dernier paramètre, défini sous la forme d'un coefficient k_0 qui est substitué au paramétrage du diamètre des fils de bobinage.

1.2 Calcul de masse

Les longueurs moyennes d'une spire du bobinage primaire L_{b1} (à l'intérieur de la fenêtre de bobinage) et secondaire L_{b2} (à l'extérieur de la fenêtre de bobinage) s'expriment par les relations suivantes, établies d'après la vue de dessus à la Figure 3.1 :

$$L_{b1} = 2e_n + 2L_a + \pi(1 - k_0)\frac{h_b}{3} \quad L_{b2} = 2e_n + 2L_a + \pi(2 - k_0)\frac{h_b}{3} \quad (3.1)$$

Les sections des fenêtres de bobinages primaire S_{b1} et secondaire S_{b2} ainsi que la surface du circuit magnétique S_{cm} s'écrivent ensuite :

$$S_{b1} = (1 - k_0)\frac{h_b^2}{3} \quad S_{b2} = k_0\frac{h_b^2}{3} \quad S_{cm} = 2e_n \left(e_n + 4\frac{h_b}{3} \right) \quad (3.2)$$

En notant k_r le coefficient de remplissage du cuivre dans la fenêtre de bobinage, k_{lam} le coefficient de foisonnement de l'empilement de tôles, ρ_c et ρ_{fe} la masse volumique respectivement du cuivre et du fer, les masses des deux constituants du transformateur (M_b pour la masse du bobinage et M_{cm} pour celle du circuit magnétique) permettent d'écrire l'expression du premier objectif d'optimisation, la masse totale des parties actives du transformateur M_{tot} .

$$M_{tot} = M_b + M_{cm} \text{ avec } \begin{cases} M_b = k_r \rho_c (L_{b1} S_{b1} + L_{b2} S_{b2}) \\ M_{cm} = k_{lam} \rho_{fe} L_a S_{cm} \end{cases} \quad (3.3)$$

1.3 Modélisation électrique du transformateur

1.3.1 Rapport de transformation et contrainte d'induction maximale

Les tensions aux bornes du bobinage primaire U_1 et secondaire U_2 du transformateur sont imposées par le cahier des charges. Nous obtenons ainsi le rapport de transformation, m . Celui-ci s'exprime aussi en fonction du rapport du nombre de spires secondaire et primaire. De même, la puissance absorbée par la charge P_2 et la tension de sortie nous donnent le courant au secondaire du transformateur I_2 puis le courant primaire I_1 .

$$m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow N_2 = mN_1 \quad \text{et} \quad I_1 = mI_2 \quad (3.4)$$

L'induction maximale dans le circuit magnétique, estimée dans le noyau central du transformateur, s'exprime en fonction de la tension primaire, de la pulsation électrique d'alimentation ω_s et de la section transversale du noyau central $S_n = k_{lam} e_n L_a$.

$$\hat{B} = \frac{\sqrt{2}U_1}{N_1 S_n \omega_s} \quad (3.5)$$

1.3.2 Bilan d'énergies

Pertes de fonctionnement. Le transformateur est le siège de deux types de pertes : les pertes fer et les pertes Joule. La somme des pertes fer et des pertes par effet Joule donne les pertes de fonctionnement : $P_{fct} = P_J + P_f$. Afin de ramener ces pertes à une consommation d'énergie sur la durée totale d'utilisation, nous intégrons ensuite l'expression de P_{fct} sur l'ensemble du cycle de fonctionnement prévu dans le cahier des charges. Nous obtenons alors une énergie qui sera additionnée à l'énergie consommée durant les autres phases du cycle de vie du transformateur.

Les pertes fer sont estimées dans notre cas suivant la formulation empirique de Steinmetz en régime sinusoïdal [Liw67] qui nous donne une formulation des pertes fer volumiques. Les pertes fer se répartissent en deux composantes : les pertes par hystérésis P_H et les pertes par courants de Foucault P_{cF} . Nous supposons l'induction est homogène dans le circuit magnétique. En notant f_s la fréquence du réseau électrique d'alimentation du transformateur, k_H le coefficient des pertes par hystérésis, k_{cF} le coefficient des pertes par courant de Foucault, les pertes fer P_f s'écrivent :

$$P_f = P_H + P_{cF} = (P_H^v + P_{cF}^v) k_{lam} S_{cm} L_a \text{ avec } \begin{cases} P_H^v = 4k_H f_s \hat{B}^2 \\ P_{cF}^v = 2k_{cF} (\pi f_s \hat{B})^2 \end{cases} \quad (3.6)$$

Les pertes par effet Joule s'obtiennent à partir de l'échauffement des enroulements soumis au passage des courants primaire et secondaire. Leur résistance est exprimée en fonction de la conductivité du matériau constitutif (ici celle du cuivre σ_c) ainsi que du rapport de la longueur moyenne des bobinages primaire et secondaire sur leur section.

$$P_J = \frac{L_{b1}}{\sigma_c k_r S_{b1}} (N_1 I_1)^2 + \frac{L_{b2}}{\sigma_c k_r S_{b2}} (N_2 I_2)^2 \quad (3.7)$$

Energie globale sur cycle de vie. Nous répartissons l'énergie globale sur cycle de vie E_{acv} sur deux composantes. Tout d'abord l'énergie consommée lors de la phase de fonctionnement (hors énergie utile) E_{fct} puis l'énergie des autres phases du cycle de vie E_{mat} (notée ainsi car elle est calculée à partir de la masse des matériaux). Les différents coûts élémentaires énergétiques sont regroupés en Annexe A, page 197. Nous en proposons un extrait comportant les chiffres utilisés dans les simulations sur le modèle de transformateur monophasé dans la Table 3.1. Le mix énergétique est utilisé pour ramener les pertes de fonctionnement en énergie primaire afin de pouvoir les additionner aux coûts énergétiques des autres phases du cycle de vie. En notant M_m la masse d'un matériau constitutif du transformateur et $E_{p,m}^m$ l'énergie massique élémentaire d'une phase du cycle de vie pour un matériau constitutif du transformateur, nous avons :

$$E_{acv} = \underbrace{\sum_m M_m E_{p,m}^m}_{E_{mat}} + \underbrace{\int P_{fct} dt}_{E_{fct}} \quad (3.8)$$

Table 3.1 – Coûts énergétiques massiques primaires utilisés dans les optimisations [BP0].

Phase du cycle de vie	Energie primaire, kWh
Extraction et production de cuivre courant (1 kg)	8,7
Extraction et production d'acier courant (1 kg)	6,3
Extraction et production d'aluminium mix européen (1 kg)	31,4
Transport en Camion >32 t sur 1000 km (1 kg)	0,6
Mix énergétique français basse tension (1 kWh électrique)	3,6
Mix énergétique européen basse tension (1 kWh électrique)	3,1

1.4 Modélisation thermique du transformateur

La contrainte thermique imposée aux optimisations porte sur la température maximale que peuvent supporter les isolants électriques au niveau des enroulements. Nous admettons que la température des isolants est identique à celle des enroulements. Le transformateur se décompose en trois régions isothermes que sont les enroulements concentrés dans les fenêtres de bobinage (de température θ_b), le circuit magnétique les entourant (de température θ_{cm}) et l'air ambiant avec lequel est en contact le transformateur (de température θ_0). Nous supposons que les échanges de chaleur sont réduits à ceux ayant lieu entre ces trois blocs isothermes. Les échanges thermiques sont représentés sous la forme de résistances thermiques dont les définitions sont les suivantes.

$\mathcal{R}_{b,cm}$ - Résistance thermique représentant la conduction thermique entre les enroulements du bobinage et le circuit magnétique à travers un isolant électrique d'épaisseur

e_i et de conductivité thermique λ_i .

$\mathcal{R}_{b,0}$ - Résistance thermique représentant la convection libre et le rayonnement entre le bobinage et l'air ambiant.

$\mathcal{R}_{cm,0}$ - Résistance thermique représentant la convection libre et le rayonnement entre le circuit magnétique et l'air ambiant.

Ces trois échanges se font à travers trois surfaces de contact : la surface entre le bobinage et le circuit magnétique $S_{b,cm}$, la surface entre le bobinage et l'air ambiant $S_{b,0}$ et enfin la surface entre le circuit magnétique et l'air ambiant $S_{cm,0}$. Nous notons $\Delta\theta_{cm,0}$ la différence de température entre le circuit magnétique et l'air ambiant, et $\Delta\theta_{b,0}$ la différence de température entre le bobinage et l'air ambiant. En posant h le coefficient de convection et de rayonnement associé aux échanges thermiques entre le circuit magnétique et l'air ainsi qu'entre le bobinage et l'air (nous supposons qu'il est identique dans les deux cas) nous pouvons donner une expression des résistances thermiques mises en jeu dans les échanges thermiques du transformateur monophasé à partir de sa géométrie.

$$\mathcal{R}_{b,cm} = \frac{e_i}{\lambda_i S_{b,cm}} \quad \mathcal{R}_{b,0} = \frac{1}{h.S_{b,0}} \quad \mathcal{R}_{cm,0} = \frac{1}{h.S_{cm,0}} \quad (3.9a)$$

avec l'expression des surfaces de contact, se référer à la Figure 3.1 :

$$\begin{aligned} S_{b,cm} &= \frac{16}{3} h_b L_a & S_{b,0} &= \frac{2}{9} (15e_n h_b + 4\pi h_b^2) \\ S_{cm,0} &= 2e_n (3L_a + 2e_n) + \frac{10}{3} h_b (L_a + e_n) \end{aligned} \quad (3.9b)$$

1.4.1 Régime thermique permanent

Le schéma du modèle thermique proposé à la Figure 3.2 nous permet d'exprimer analytiquement l'élévation de température du bobinage et du circuit magnétique du transformateur monophasé par rapport à l'air ambiant.

Nous écrivons donc l'expression de la différence de température entre le bobinage et l'air ambiant :

$$\Delta\theta_{b,0} = \mathcal{R}_{b,0} \cdot \frac{(\mathcal{R}_{b,cm} + \mathcal{R}_{cm,0})P_J + \mathcal{R}_{cm,0}P_f}{\mathcal{R}_{b,cm} + \mathcal{R}_{b,0} + \mathcal{R}_{cm,0}} \quad (3.10)$$

Nous pouvons obtenir la valeur des contraintes thermique instantanément à l'échelle des temps de calculs d'optimisations. Cela vient du fait qu'il est inutile dans ce cas de prévoir une expression temporelle des pertes et de simuler la réponse du modèle thermique correspondante.

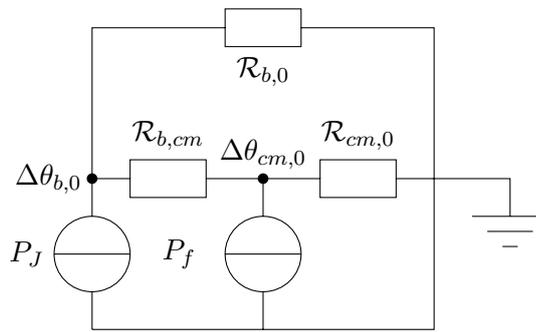


Figure 3.2 – Schéma électrique équivalent en régime thermique permanent du transformateur.

1.4.2 Régime thermique transitoire

Lors d'une utilisation du transformateur sur des périodes suffisamment brèves devant ses constantes de temps thermiques pour ne plus pouvoir considérer que le transformateur atteint son régime permanent thermique, nous introduisons les capacités thermiques de ses deux constituants. Ainsi l'inertie thermique des deux éléments pris en compte dans le calcul de la masse du transformateur fait apparaître deux nouveaux composants dans le schéma thermique équivalent électrique présenté à la Figure 3.2, remanié et présenté à la Figure 3.3, en notant \mathcal{C}_b la capacité thermique du bobinage et \mathcal{C}_{cm} celle du circuit magnétique du transformateur. Leurs valeurs se calculent d'après le produit de la masse des matériaux et de leur capacité thermique massique.

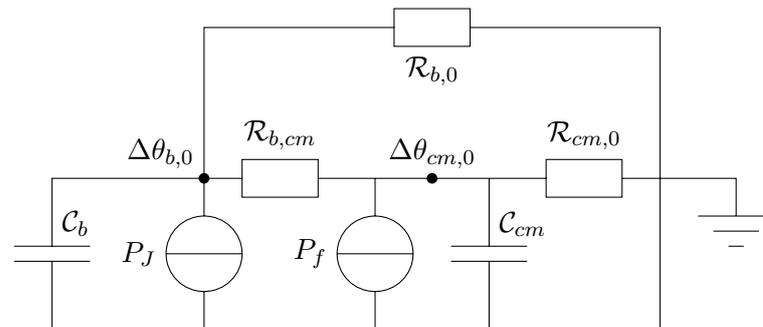


Figure 3.3 – Schéma électrique équivalent en régime thermique transitoire du transformateur.

Il reste possible d'exprimer, dans ce cas, les variations temporelles des deux élévations de températures $\Delta\theta_{b,0}$ et $\Delta\theta_{cm,0}$ de façon analytique en fonction des variations des pertes Joule et fer durant l'utilisation du transformateur. Ceci permet de garder des temps de simulation limités. En effet, dès que la modélisation thermique n'est plus possible de façon analytique, l'introduction d'une modélisation par éléments finis augmente encore significativement les temps de calculs, qui peuvent devenir rédhibitoires lors de simula-

tions temporelles, lancées pour chaque individu de chaque génération dans le cadre d'une optimisation par algorithme évolutionnaire.

L'expression temporelle des pertes est décrite à partir du cycle de fonctionnement de la charge associée au transformateur (la courbe temporelle de la puissance absorbée par la charge quand elle est connectée). Nous simulons ensuite la réponse temporelle du modèle thermique transitoire aux deux entrées que constituent P_J et P_f . En notant s la variable de Laplace, nous avons :

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_{b,0} \\ \Delta\theta_{cm,0} \end{bmatrix} = \frac{1}{\mathcal{F}_d} \cdot \begin{bmatrix} \mathcal{F}_{11} & \mathcal{F}_{12} \\ \mathcal{F}_{21} & \mathcal{F}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_J \\ P_f \end{bmatrix} \quad (3.11a)$$

avec

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_{12} &= \mathcal{R}_{b,0} (\mathcal{R}_{cm,0} + \mathcal{R}_{b,cm} + s\mathcal{R}_{cm,0}\mathcal{R}_{b,cm}\mathcal{C}_{cm}) \\ \mathcal{F}_{12} = \mathcal{F}_{21} &= \mathcal{R}_{b,0}\mathcal{R}_{cm,0} \\ \mathcal{F}_{22} &= \mathcal{R}_{cm,0} (\mathcal{R}_{b,0} + \mathcal{R}_{b,cm} + s\mathcal{R}_{b,0}\mathcal{R}_{b,cm}\mathcal{C}_b) \end{aligned} \quad (3.11b)$$

et

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_d &= \mathcal{R}_{cm,0} + \mathcal{R}_{b,0} + \mathcal{R}_{b,cm} \\ &+ s [\mathcal{R}_{b,0}\mathcal{C}_b (\mathcal{R}_{cm,0} + \mathcal{R}_{b,cm}) + \mathcal{R}_{cm,0}\mathcal{C}_{cm} (\mathcal{R}_{b,0} + \mathcal{R}_{b,cm})] \\ &+ s^2 [\mathcal{R}_{b,cm}\mathcal{R}_{b,0}\mathcal{R}_{cm,0}\mathcal{C}_{cm}\mathcal{C}_b] \end{aligned} \quad (3.11c)$$

Des réponses temporelles d'élévation en température que donne l'outil de simulation de systèmes linéaires, nous récupérons la valeur maximale de $\Delta\theta_{b,0}$ atteintes sur la durée totale d'utilisation du transformateur. Celle-ci est comparée à la contrainte thermique établie précédemment. Notons que le seul passage d'une modélisation thermique en régime permanent à une modélisation thermique en régime transitoire dans un cas comme celui-ci représente plus d'un facteur dix sur les temps de calcul global. En effet, le temps de simulation (optimisation lancée sur 2000 générations de 100 individus) est d'environ une minute avec la modélisation en régime permanent thermique et de dix avec la modélisation en régime transitoire thermique.

Cette modélisation thermique est validée expérimentalement sur un transformateur monophasé disponible au laboratoire. Nous alimentons le transformateur à puissance nominale et traçons l'élévation de température correspondant à un échelon d'alimentation, comme présenté à la Figure 3.4. Le calcul de l'élévation de température du bobinage du transformateur réel se fait par mesure volt-ampère-métrique, la résistivité du bobinage nous donnant indirectement l'indication de température souhaitée. Il s'agit d'un transformateur 230 V 50 Hz de 2 kVA dont le rapport de transformation est unitaire. Les valeurs des paramètres sont dans son cas : $h_b = 12$ cm ; $e_n = 8$ cm ; $L_a = 4,4$ cm ; $k_0 = 0.5$ et $N_1 = 200$ spires.

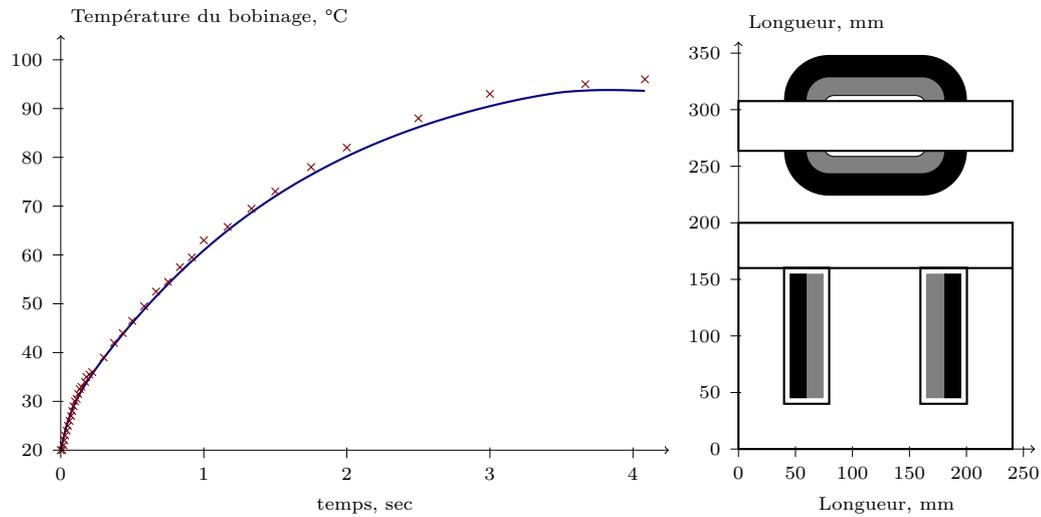


Figure 3.4 – Validation expérimentale du modèle analytique thermique transitoire. Comparaison des calculs analytiques (traits) et par l'expérience (points). Tracé du paramétrage, déduit du transformateur expérimental, utilisé pour les calculs analytiques.

2. Mise en place des simulations

2.1 Considérations préalables

Toute l'étude qui entoure le composant électrotechnique tourne évidemment autour du service utile qu'il doit rendre. Ce cahier des charges constitue dans notre cas l'utilisation qui est faite du transformateur monophasé sur sa phase de fonctionnement.

Le transformateur est prévu pour élever la tension alternative de 12 V à 230 V ; 50 Hz, et est déconnecté lorsqu'il n'est pas utilisé. La puissance de la charge est fixée dans un premier temps à 200 W.

Le transformateur est utilisé chaque jour pendant sept ans. Nous définissons ainsi un cycle de fonctionnement quotidien plutôt qu'un profil d'utilisation modélisé sur sept ans. L'action sur la forme de ce cycle est l'objet de discussions illustrant l'impact de l'analyse sur cycle de vie sur les résultats d'optimisation.

Le transformateur est utilisé à puissance nominale sur une durée d'utilisation variable t_{eq} comme présenté à la Figure 3.5. Au delà il est considéré comme débranché de la charge et de son alimentation. Ainsi, à puissance de charge donnée, seule l'action sur la durée t_{eq} est significative dans ces optimisations. Nous comparons ensuite les résultats d'optimisation obtenus avec un modèle thermique en régime permanent à des résultats

d'optimisation obtenus avec un modèle thermique en régime transitoire sur des cycles de définition identiques.

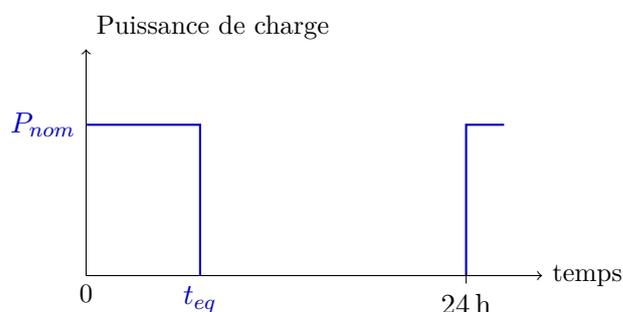


Figure 3.5 – Profil de charge journalier du transformateur monophasé.

2.2 Paramètres et contraintes d'optimisation

Avant de dimensionner concrètement le modèle de transformateur monophasé, nous définissons le domaine de variation des paramètres. L'optimisation porte sur les paramètres définis à la section §1.1.2 page 72, ces paramètres représentant dans notre cas la géométrie du transformateur et la disposition des enroulements. Leurs fourchettes de variation sont regroupées dans la Table 3.2. Le choix des fourchettes de variations empêche l'algorithme évolutionnaire de tester des géométries trop extrêmes dans le plan des objectifs, notamment d'une masse trop élevée.

L'optimisation des dimensions du transformateur monophasé se fait sous deux contraintes : une butée d'induction magnétique et une butée en température sur le bobinage. Les valeurs des contraintes sont résumées dans la Table 3.3. Ces deux contraintes vont avoir pour effet de limiter la réduction des dimensions du bobinage (contrainte thermique) et du circuit magnétique (contrainte d'induction).

Table 3.2 – Fourchettes de variation des paramètres d'optimisation.

Paramètres	Fourchette
Longueur du paquet de tôles, m	$2 \cdot 10^{-3} \leq L_a \leq 2 \cdot 10^{-1}$
Épaisseur du noyau central, m	$10^{-3} \leq e_n \leq 10^{-1}$
Hauteur de la fenêtre de bobinage, m	$10^{-3} \leq h_b \leq 10^{-1}$
Répartition de la surface des fenêtres de bobinage	$10^{-2} \leq k_0 \leq 1$
Nombre de spires du bobinage primaire du transformateur	$1 \leq N_1 \leq 10^5$

Table 3.3 – Valeur des contraintes d'optimisation du transformateur.

Contraintes	Valeur
Température maximale du bobinage	130 °C
Niveau d'induction maximale dans le circuit magnétique du transformateur	1,5 T

2.3 Synoptique d'optimisation

Nous optimisons les dimensions géométriques et la répartition du bobinage entre le primaire et le secondaire d'un transformateur monophasé. Cette optimisation se fait selon cinq paramètres, décrits à la section §1.1.2 page 72 et deux critères : la masse des parties actives du transformateur et son énergie globale sur cycle de vie. Le synoptique d'optimisation retenu pour le dimensionnement de ce modèle de transformateur monophasé est proposé à la Figure 3.6.

3. Optimisation du transformateur monophasé

L'analyse des résultats d'optimisation est divisée en trois parties. La première partie traite de la comparaison entre la minimisation de l'énergie globale sur cycle de vie et la minimisation de l'énergie cumulée des pertes durant la seule phase de fonctionnement. La deuxième partie traite de la sensibilité des résultats d'optimisation sur cycle de vie à différentes variables clefs, notamment les coûts élémentaires énergétiques. La dernière partie introduit la notion de vieillissement dans le calcul de la durée totale d'utilisation du transformateur.

Notons avant toute chose que suivant l'action dans les optimisations d'un changement des données du problème, il apparaît une variation de la répartition des solutions Pareto-optimales. Ces fronts étant obtenus par des optimisations différentes, il faut les comparer suivant le placement des solutions dans l'espace des objectifs. Dans cet espace, la comparaison des fronts de solutions Pareto-optimales porte plus spécifiquement sur trois points particuliers : les extrêmes de masse minimale et d'énergie minimale (dont la position est liée à l'action des contraintes ainsi que du choix des fourchettes de variation des paramètres) et les solutions de compromis. En effet, suivant l'action du changement des données du problème sur ces trois points nous pouvons commenter son intérêt spécifique dans le cadre d'un dimensionnement sur cycle de vie. Ainsi du point de vue du critère de minimisation de l'énergie sur cycle de vie, les variations significatives sont, dans l'ordre d'intérêt, celles portant sur le point d'énergie minimale, puis les solutions de compromis et enfin celles portant sur le point de masse minimale.

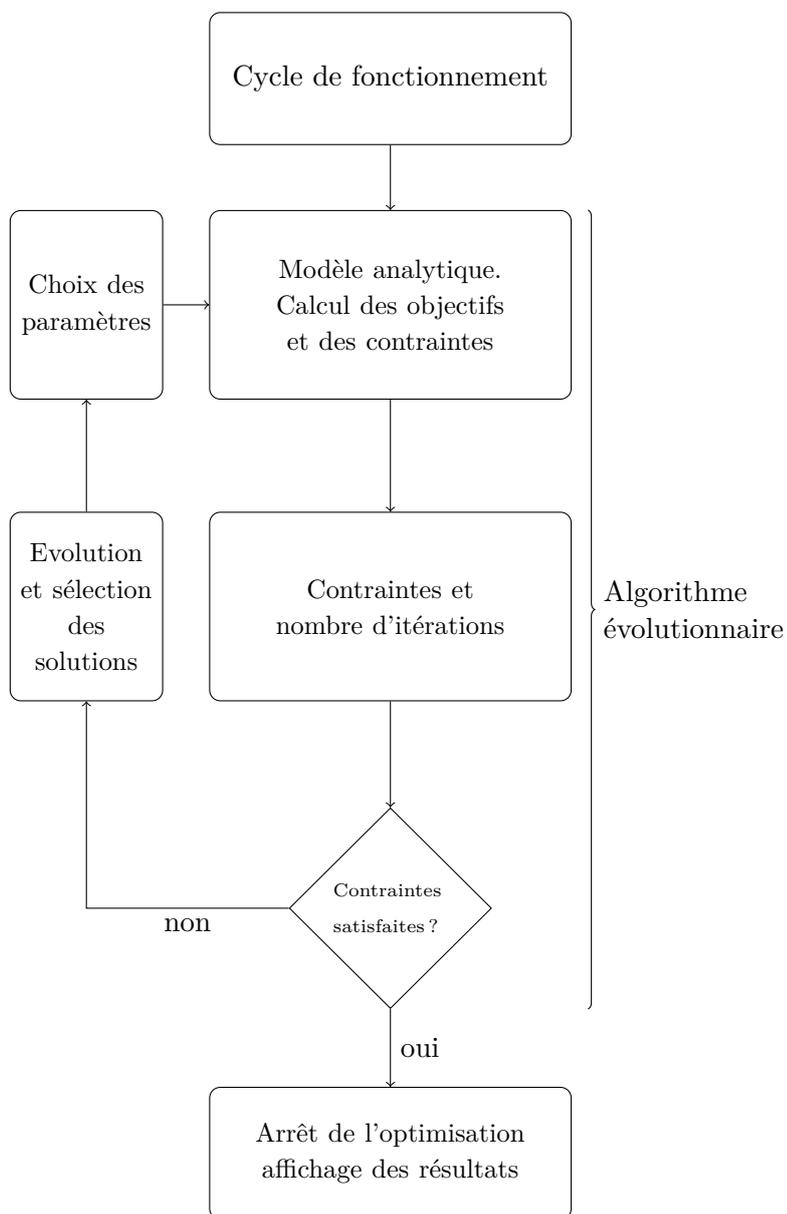


Figure 3.6 – Synoptique d'optimisation du transformateur monophasé.

3.1 Impact du cycle de vie sur le dimensionnement

Afin d'identifier l'action du critère de minimisation de l'énergie globale sur cycle de vie sur le dimensionnement du transformateur monophasé, nous comparons les résultats d'optimisation obtenus selon ce critère à d'autres résultats d'optimisation obtenus avec un critère de minimisation d'énergie similaire mais ne portant que sur la phase du cycle de vie qui produit le service utile. Il s'agit de la phase de fonctionnement, traditionnellement celle qui est prise en compte dans la conception des composants électrotechniques.

L'évolution de l'énergie des pertes de fonctionnement est différente de celle du reste de l'énergie sur cycle de vie suivant les paramètres d'optimisation. De fait, l'énergie des pertes de fonctionnement représente une partie de l'énergie globale sur cycle de vie qui ne dépend pas directement des mêmes données physiques que le reste des consommations énergétiques du cycle de vie du transformateur. Cette propriété fondamentale, qui vient du fait que le produit étudié est un composant présentant des pertes de fonctionnement significatives lorsqu'il produit son service utile, accentue la sensibilité des résultats d'optimisation au cycle de fonctionnement. En effet, suivant le type de composant du Génie Electrique retenu, c'est-à-dire suivant l'utilisation qui est prévue d'en faire, l'énergie sur cycle de vie ne présente pas toujours une alternative justifiée comme critère de conception devant le seul cumul des pertes de fonctionnement.

3.1.1 Optimisations en régime thermique permanent

Pour ces premières simulations nous choisissons un cycle de fonctionnement de cinq heures par jour, répété sur sept ans. Cette valeur de t_{eq} est choisie pour obtenir un ordre de grandeur équivalent entre E_{mat} et E_{fct} dans les fourchettes de variation des paramètres d'optimisation et ainsi permettre d'observer le point d'énergie globale sur cycle de vie minimale. Nous observons tout d'abord à la Figure 3.7 le front des solutions Pareto-optimales opposant un objectif d'énergie globale sur cycle de vie à un objectif de masse des parties actives.

Trois solutions sont sélectionnées sur ce front : la première minimise la masse des parties actives, la seconde est une solution de compromis masse-énergie et la dernière minimise l'énergie globale sur cycle de vie. Les différences entre les trois structures sont significatives : l'énergie globale sur cycle de vie varie du simple au double et la masse varie d'un facteur dix entre les deux extrêmes. Les solutions de faible masse sont contraintes par la butée en température et en induction. Par contre, le point d'énergie globale sur cycle de vie minimale n'est pas restreint par la limite sur les paramètres d'optimisation. Il s'agit tout simplement du point d'arrêt du front de Pareto en ce sens qu'augmenter la masse du transformateur augmenterait à nouveau son énergie sur cycle de vie au delà de cette limite. Nous allons préciser ce point méthodologique significatif à la section §3.1.1 page 90, notamment par l'intermédiaire de la Figure 3.12.

Structure minimisant la masse
1250 kWh ; 2,1 kg

Structure exemple de compromis masse-énergie
900 kWh ; 4,6 kg

Structure minimisant E_{acv}
700 kWh ; 19,5 kg

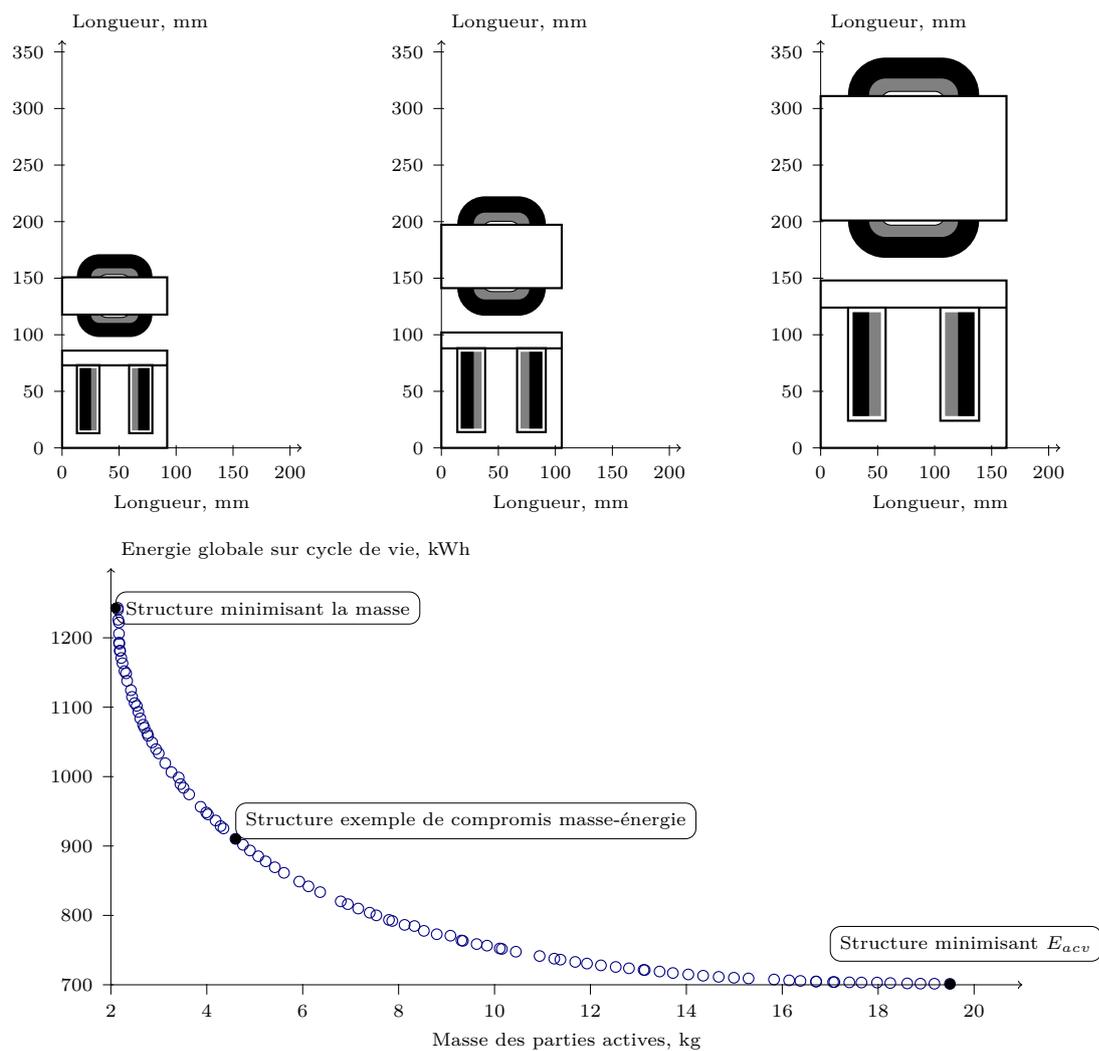


Figure 3.7 – Front de solutions Pareto-optimales et structures de transformateur associées aux solutions extrêmes ainsi qu'à une solution de compromis. Optimisation lancée sur 2000 générations de 100 individus. Puissance de charge de 200 W, utilisation du transformateur en régime thermique permanent 5 h par jour pendant sept ans.

La répartition des différents paramètres dans l'espace des objectifs est proposée à la Figure 3.8 et la répartition des différentes contraintes dans l'espace des objectifs est donnée à la Figure 3.10. La répartition des pertes de fonctionnement, de la masse des deux constituants du transformateur ainsi que des différentes contributions à l'énergie globale sur cycle de vie sont présentées quand à elles à la Figure 3.11, page 89. La répartition des solutions étant relativement différente suivant l'un ou l'autre des objectifs d'optimisation, nous présentons les deux évolutions côte à côte quand celles-ci sont notables.

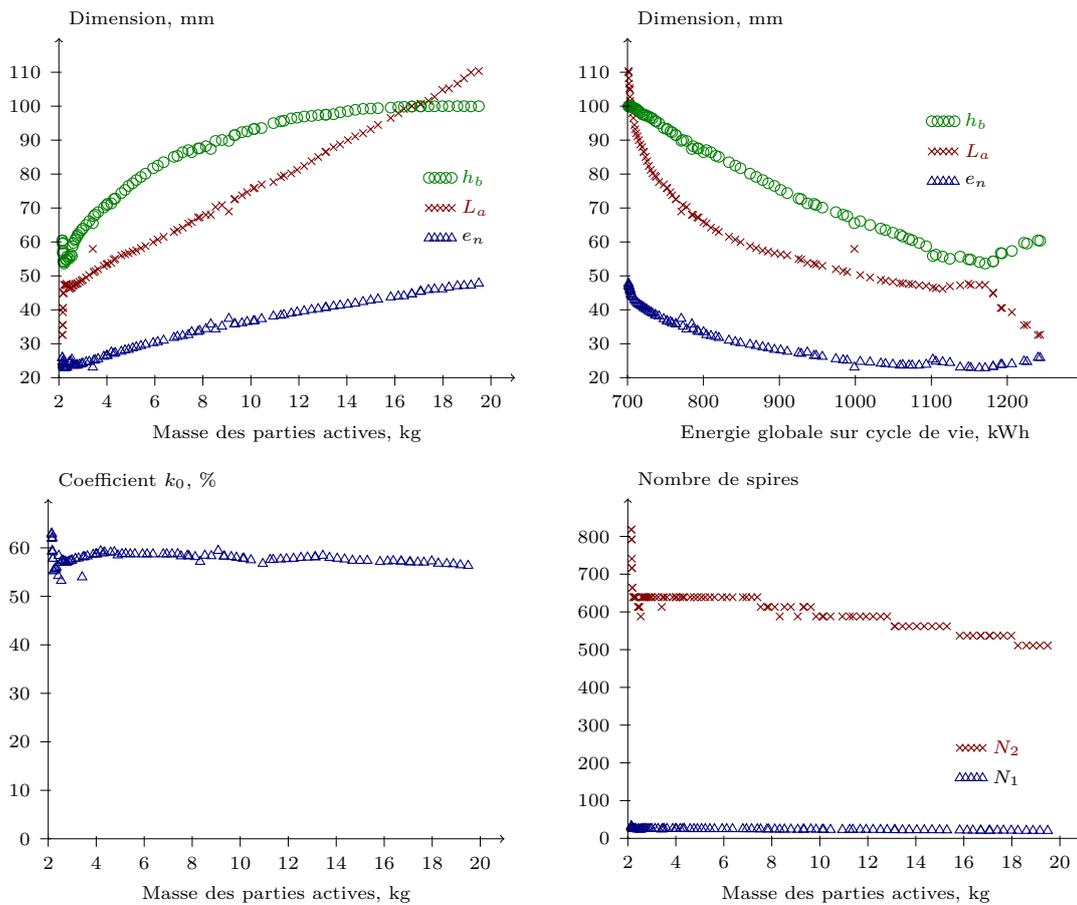


Figure 3.8 – Répartition des paramètres d'optimisations en fonction des objectifs. Optimisation lancée sur 2000 générations de 100 individus. Puissance de charge de 200 W, utilisation du transformateur en régime thermique permanent 5 h par jour pendant sept ans.

Paramètres. La variation des paramètres géométriques suit globalement la masse des parties actives. Notons toutefois un changement pente pour les paramètres h_b et L_a dans le cas de solutions de très faible masse. Ce comportement trouve une explication dans la proportion de E_{fct} et E_{mat} dans E_{acv} . En effet, il s'agit de la zone de l'espace des objectifs dans laquelle E_{fct} est majoritaire dans E_{acv} . A partir d'une masse critique, la

minimisation de l'énergie sur cycle de vie devient équivalente à la minimisation des pertes de fonctionnement. Nous constatons effectivement à la Figure 3.12 qu'à partir de ce point critique de masse (ou d'énergie) les deux fronts de solutions Pareto-optimales comparant le critères de minimisation des deux quantités d'énergie E_{fct} et E_{acv} se rejoignent.

Le coefficient k_0 varie peu autour de 60 % selon la solution retenue. La variation de la géométrie se retrouve donc répercutée sur le diamètre des fils de bobinage. Cette grandeur est proposée à la Figure 3.9, calculée dans l'hypothèse où les bobinages primaire et secondaire sont bobinés avec le même diamètre de fil et à coefficient de bobinage constant. Notons que les paliers apparaissant sur le nombre de spires (ce paramètre n'a pas une variation continue) sont aussi répercutés sur le diamètre des fils de bobinage. N_1 est un paramètre d'optimisation et $N_2 = mN_1$. De ce fait, une variation du nombre de spires N_1 d'une spire entraîne une variation de m spires sur N_2 , d'où l'impression de paliers plus importants, visibles à la Figure 3.8.

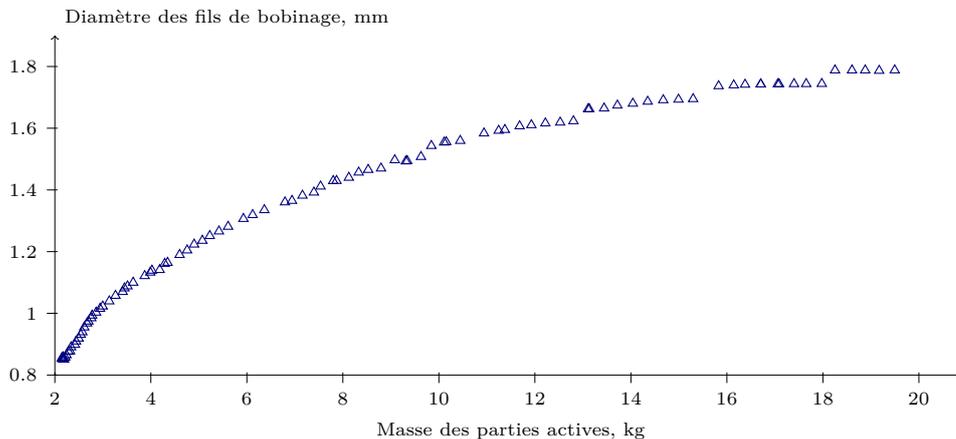


Figure 3.9 – Evolution du diamètre des fils de bobinage en fonction de la masse des parties actives. Optimisation lancée sur 2000 générations de 100 individus. Puissance de charge de 200 W, utilisation du transformateur en régime thermique permanent 5 h par jour pendant sept ans.

Contraintes. La butée d'induction magnétique est atteinte dans le cas des solutions de faible masse. Cette limitation apparait de fait sur les pertes fer qui décroissent avec la masse à partir de ce point. La contrainte thermique est aussi atteinte dans le cas des solutions de faible masse.

L'effet de la non continuité du nombre de spires est également visible sur le tracé des pertes fer et Joule, présenté à la Figure 3.11. En effet, pour chaque pallier de nombre de spires, lorsque le volume de transformateur augmente les pertes Joule augmentent à nouveau, pour diminuer brutalement au changement de nombre de spire suivant, donnant ainsi une courbe en « dent de scie ». Le fait que les solutions ne soient pas réparties sur

plus de valeurs de nombre de spires est dû au fonctionnement interne de l'algorithme évolutionnaire qui ne gère pas toujours de la meilleure manière des paramètres d'optimisation discontinus.

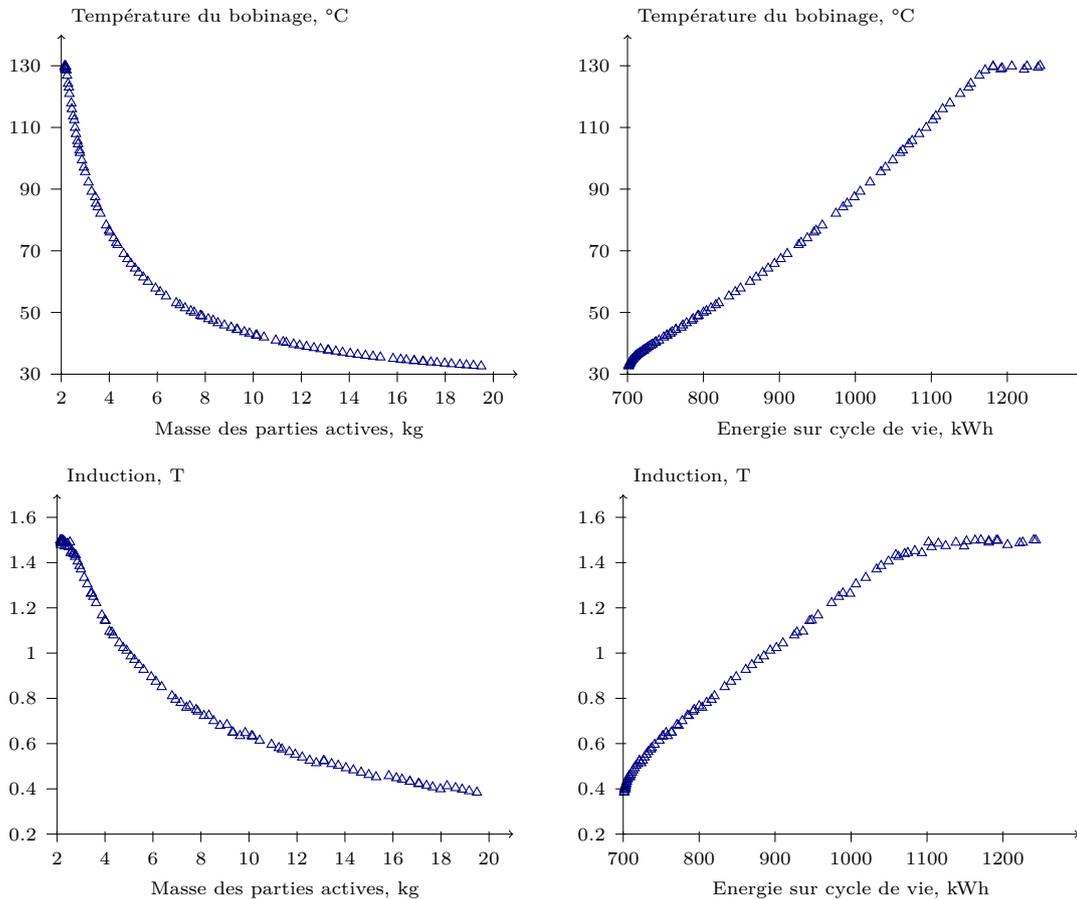


Figure 3.10 – Répartition des contraintes d'optimisations en fonction des objectifs. Optimisation lancée sur 2000 générations de 100 individus. Puissance de charge de 200 W, utilisation du transformateur en régime thermique permanent 5 h par jour pendant sept ans.

Masses et énergies. La répartition de masse entre bobinage et circuit magnétique suit respectivement l'évolution des paramètres h_b et e_n . Nous notons aussi que les pertes fer et Joule sont très proches sur une bonne partie du front. En ce qui concerne les deux contributions énergétiques à E_{acv} , leur différence croît bien avec la masse des parties actives. Notons toutefois que E_{mat} est relativement faible devant E_{fct} alors que le transformateur n'est sollicité que cinq heures par jours pendant sept ans. Une augmentation de cette durée d'utilisation rendra rapidement E_{mat} négligeable devant E_{fct} (pour des masses de transformateur raisonnables) ne justifiant plus la prise en compte de son cycle de vie dans le conception du transformateur, du moins sur le seul critère de minimisation de l'énergie globale sur cycle de vie.

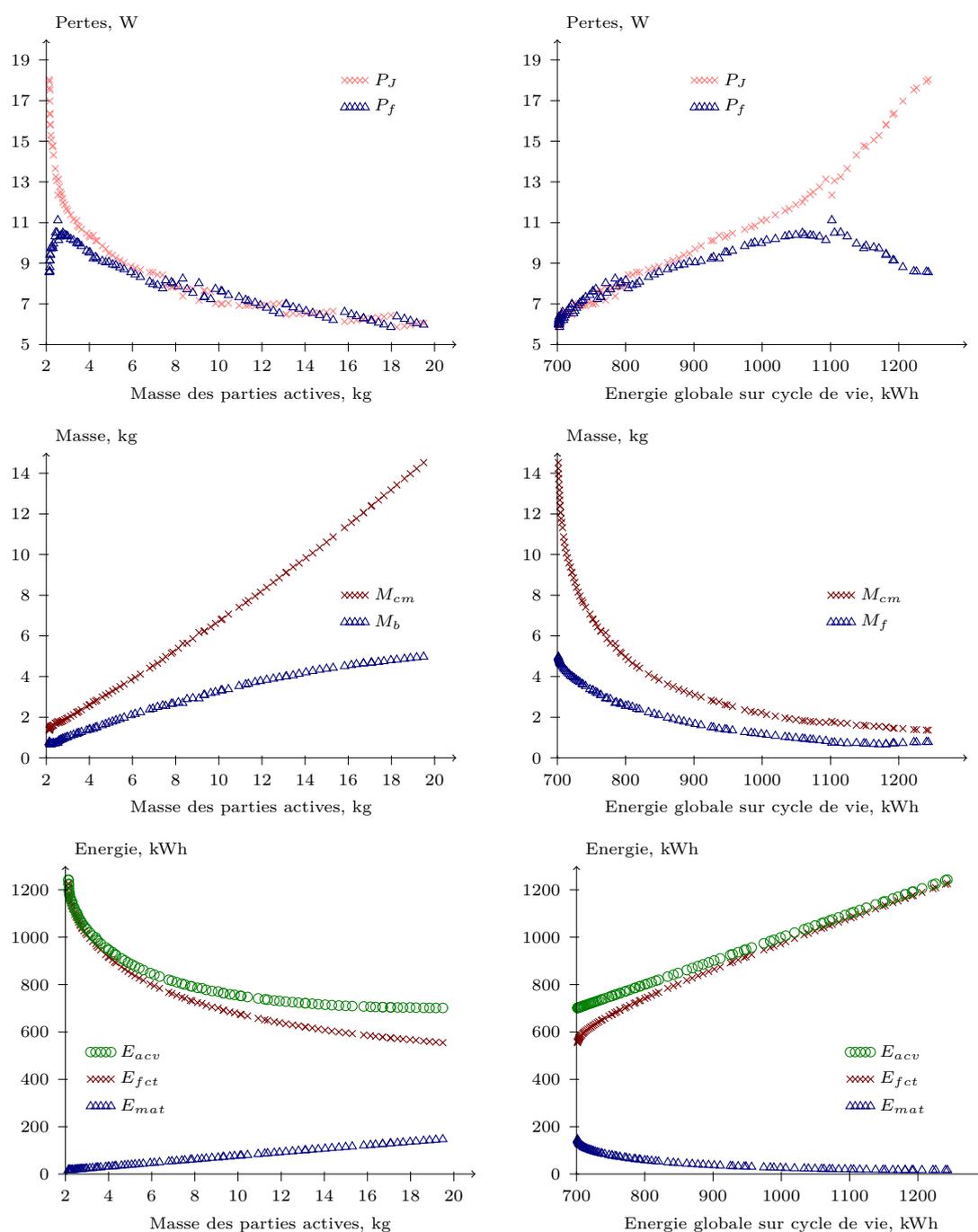


Figure 3.11 – Répartition des pertes, de la masse du bobinage et du circuit magnétique ainsi que des contributions à l'énergie globale sur cycle de vie en fonction des objectifs. Optimisation lancée sur 2000 générations de 100 individus. Puissance de charge de 200 W, utilisation du transformateur en régime thermique permanent 5 h par jour pendant sept ans.

La fourchette de choix des paramètres est atteinte par sa valeur maximale notamment dans le cas de la hauteur de fenêtre de bobinage, empêchant l'algorithme de se tourner vers les solutions de plus fortes masses. Notons que la limitation maximale sur les paramètres géométriques est choisie de sorte qu'elle empêche effectivement le front de solutions Pareto-optimales de trop s'étendre vers les solutions de forte masse. Ceci se révèle utile notamment lors des optimisations minimisant l'énergie sur la seule phase de fonctionnement qui donnerait alors des solutions présentant de très fortes masses et de très faibles pertes de fonctionnement, inutiles dans le cadre de nos comparaisons.

Minimisation de l'énergie des pertes de fonctionnement. Une comparaison entre la minimisation de l'énergie sur cycle de vie et la minimisation de l'énergie sur la seule phase de fonctionnement est présentée à la Figure 3.12. Aux courbes déjà obtenues par un dimensionnement sur cycle de vie (sombres), nous superposons les solutions obtenues par un dimensionnement sur la seule phase de fonctionnement (claires) dont l'énergie globale sur cycle de vie a été calculée après coup pour les solutions Pareto-optimales. Les solutions de masse plus importantes minimisant E_{fct} qui apparaissent alors, augmentent en réalité E_{acv} par l'apport du coût énergétique dû à l'augmentation de la masse E_{mat} . Ceci est plus flagrant encore dans la représentation en fonction de l'objectif d'énergie. Notons que l'optimisation sur la phase de fonctionnement va jusqu'à quadrupler la masse maximale pour diminuer l'énergie des pertes en fonctionnement de moins de 20 %.

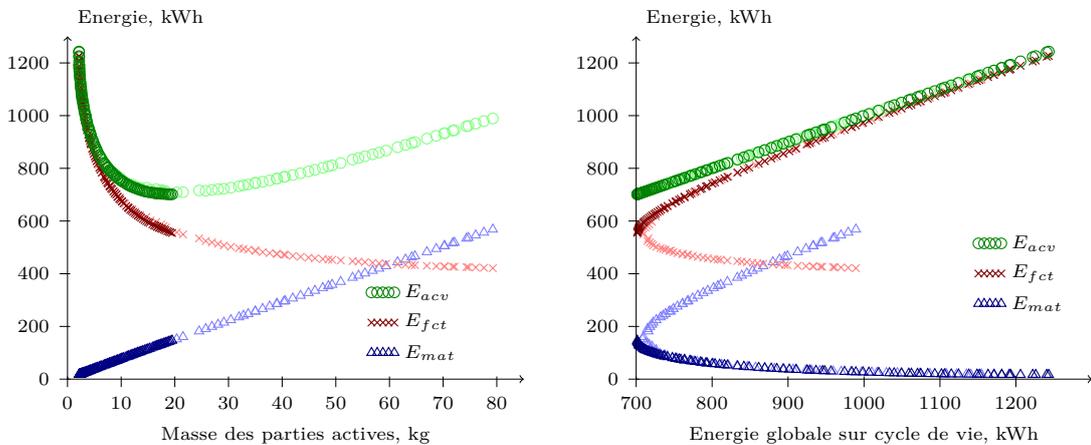


Figure 3.12 – Comparaison d'optimisations minimisant E_{acv} (sombres) dont E_{fct} et E_{mat} ont été recalculés après optimisation et minimisant E_{fct} (claires) dont E_{acv} et E_{mat} ont été recalculés après optimisation. Optimisation lancée sur 2000 générations de 100 individus. Puissance de charge de 200 W, utilisation du transformateur en régime thermique permanent 5 h par jour pendant sept ans.

La distribution des solutions obtenue lors de la minimisation de l'énergie sur cycle de vie ne fait pas apparaître la partie de la courbe représentant les structures de masse et d'énergie plus élevées situées après le minimum d'énergie globale sur cycle de vie. En

effet, ces solutions non optimales sont rejetées par l'algorithme évolutionnaire. Ces solutions apparaissent à la Figure 3.12 en minimisant l'énergie des pertes de fonctionnement et en calculant après coup l'énergie globale sur cycle de vie des solutions optimales obtenues. De plus, la minimisation des pertes de fonctionnement ne propose pas de minimum d'énergie. En effet, les solutions sont contraintes par la butée maximale sur les paramètres d'optimisation, définissant indirectement une masse maximale.

En ce qui concerne les solutions de compromis (le coude du front) ainsi que celles minimisant l'énergie consommée, nous constatons que la non prise en compte de l'analyse sur cycle de vie conduit à des solutions d'optimisations dont la répartition des paramètres peut être significativement fautive. Nous constatons ceci à la Figure 3.13, proposant la répartition des paramètres d'optimisation en fonction de la masse des parties actives dans les deux cas d'optimisation.

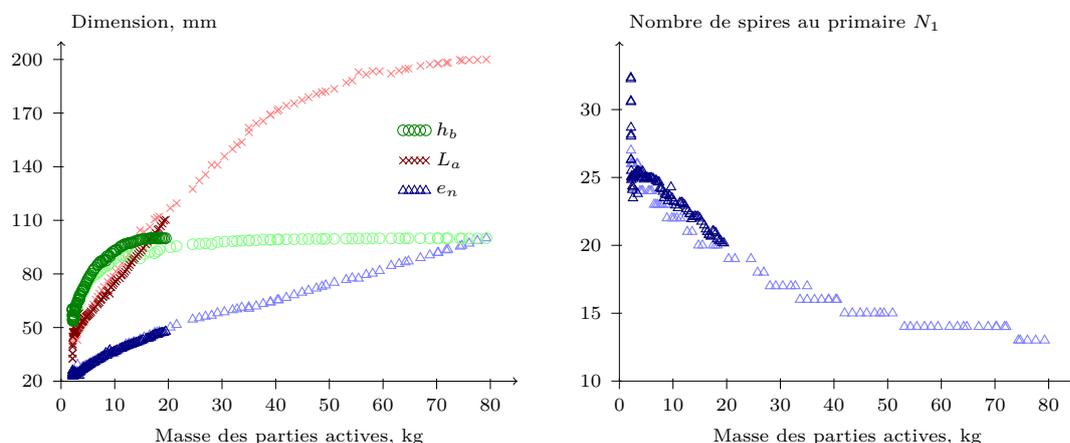


Figure 3.13 – Répartition des paramètres d'optimisations en fonction de la masse des parties actives dans le cas d'une optimisation de l'énergie sur cycle de vie (sombres) et de l'énergie des pertes de fonctionnement (claires). Optimisation lancée sur 2000 générations de 100 individus. Puissance de charge de 200 W, utilisation du transformateur en régime thermique permanent 5 h par jour pendant sept ans.

La minimisation sur cycle de vie de l'énergie consommée par le transformateur n'apporte malheureusement pas de solutions beaucoup plus intéressantes que les solutions obtenues par minimisation de l'énergie sur la seule phase de fonctionnement dont l'énergie sur cycle de vie est calculée après coup pour éliminer celle qui sont manifestement non optimales. Cet état de fait provient du couplage partiel entre les deux objectifs d'optimisation qui permet à partir de la répartition en masse des solutions de déduire la composition de l'énergie globale sur cycle de vie. Un modèle de composant électrotechnique plus complexe ne présentera pas cette particularité.

Les solutions obtenues avec le critère sur cycle de vie sont naturellement plus coûteuses en énergie, mais l'écart n'est pas constant suivant la masse de la structure optimale consi-

dérée et devient négligeable même dans le cas des structures de très faible masse. Ainsi, lorsque les deux fronts de solutions Pareto-optimales se rejoignent, minimiser l'énergie globale sur cycle de vie revient à minimiser l'énergie des pertes de fonctionnement.

Cela ne signifie pas que l'analyse sur cycle de vie est inutile, car l'optimisation porte sur l'ensemble des masses et non la seule partie située dans l'espace des objectifs de faibles masses. Notons toutefois que l'analyse sur cycle de vie de la consommation énergétique du transformateur (qui peut être généralisée aux autres impacts environnementaux) est un critère qui perd de sa pertinence lors d'une conception qui recherche un composant électrotechnique de masse minimum.

Effet de la durée de sollicitation sur les résultats d'optimisation. La durée de sollicitation du transformateur est un des leviers à notre disposition pour comparer la minimisation de l'énergie sur l'ensemble du cycle de vie par rapport à celle consommée sur la seule phase de fonctionnement. Nous choisissons d'illustrer ce point en simulant trois durées de sollicitation du transformateur monophasé : 10, 5 et 2,5 h par jour, répétés sur sept ans. La comparaison des résultats d'optimisation sur cycle de vie et sur la seule phase de fonctionnement est présentée à la Figure 3.14.

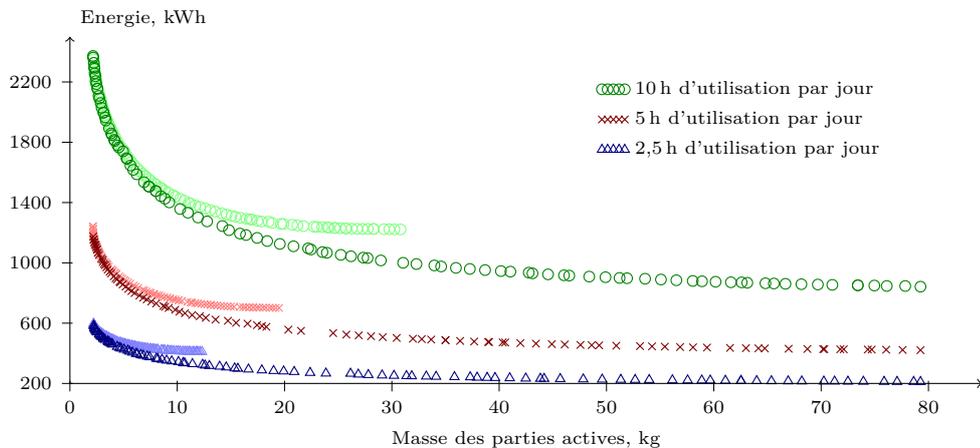


Figure 3.14 – Comparaison d'optimisations sur critère de minimisation de l'énergie sur cycle de vie (sombres) et sur la seule phase de fonctionnement (claires) pour trois durées de sollicitation par jour. Optimisations lancées sur 2000 génération de 100 individus. Puissance de charge de 200 W, utilisation du transformateur en régime thermique permanent pendant sept ans.

En ce qui concerne les optimisations sur cycle de vie, nous constatons dans un premier temps que l'ensemble des solutions optimales proposées par l'algorithme d'optimisation est d'autant plus réduit dans l'espace des objectifs que le temps de sollicitation par jour est faible. En effet, la diminution de la durée de sollicitation du transformateur diminue la proportion de E_{fct} dans E_{acv} , rendant les coûts énergétiques rassemblés dans E_{mat}

d'autant plus importants. De ce fait, les optimisations sont plus rapidement limitées par l'augmentation des dimensions impliquant une augmentation de la masse. Les résultats d'optimisation minimisant E_{fct} ne sont, quant à eux, pas limités en masse, hormis par la butée maximale sur les paramètres d'optimisation.

Les deux types d'optimisations (minimisation de E_{acv} et minimisation de E_{fct}) ont des solutions de masse des parties actives minimales identiques, que ce soit en termes d'objectifs ou en terme de paramètres. En effet, la contrainte de température maximale est atteinte dans ce cas. Par contre, nous retrouvons la contribution de E_{mat} dans la différence entre chaque couple de fronts de solutions optimales, à cycle de fonctionnement identique. Cette contribution est d'autant plus marquée que la masse de la solution est forte.

Il apparaît un écart entre les solutions d'énergie minimale suivant que les optimisations minimisent E_{acv} ou E_{fct} . De plus, les fronts de solutions Pareto-optimales obtenus avec les deux critères énergétiques ne se rapprochent pas avec l'augmentation de la durée de sollicitation par jour. De l'autre côté du front de Pareto, les fronts d'optimisations se rapprochent deux à deux. De ce fait, suivant le critère d'optimisation retenu (minimisation de la masse ou de l'énergie), la prise en compte de l'analyse sur cycle de vie est plus ou moins pertinente.

Ce constat ne remet pas en cause l'intérêt de l'analyse sur cycle de vie d'un point de vue méthodologique, mais permet de souligner qu'il s'agit d'un critère d'optimisation au même titre qu'un autre. Un raisonnement économique aurait d'ailleurs conduit aux mêmes conclusions. Le choix final de la solution revient en fin de compte au concepteur. Rappelons à toute fin utile qu'un critère environnemental n'a de poids devant les autres critères utilisés couramment (encombrement, masse ou investissement financier) que par la volonté du concepteur de lui donner une certaine prépondérance et non d'une obligation technique incontournable. La mise en avant de structures à moindre impact environnemental découle donc d'un choix (forcé ou non) et peut mener à des solutions moins performantes selon les autres critères d'optimisation.

3.1.2 Optimisations en régime thermique transitoire

Il existe une différence apportée aux résultats d'optimisation par la prise en compte de l'inertie thermique du transformateur. En effet, lors de sollicitations trop brèves devant ses constantes thermiques, il est possible que le transformateur n'atteigne pas son régime thermique permanent. Dans ce cas une modélisation en régime thermique permanent conduit à un « sur-dimensionnement ». Notons que ce cas de figure risque fort de correspondre aux cas où l'optimisation sur cycle de vie est performante. Ce point est illustré sur les optimisations présentées à la Figure 3.15.

Régime thermique transitoire
310 kWh ; 1,6 kg

Régime thermique permanent
250 kWh ; 2,2 kg

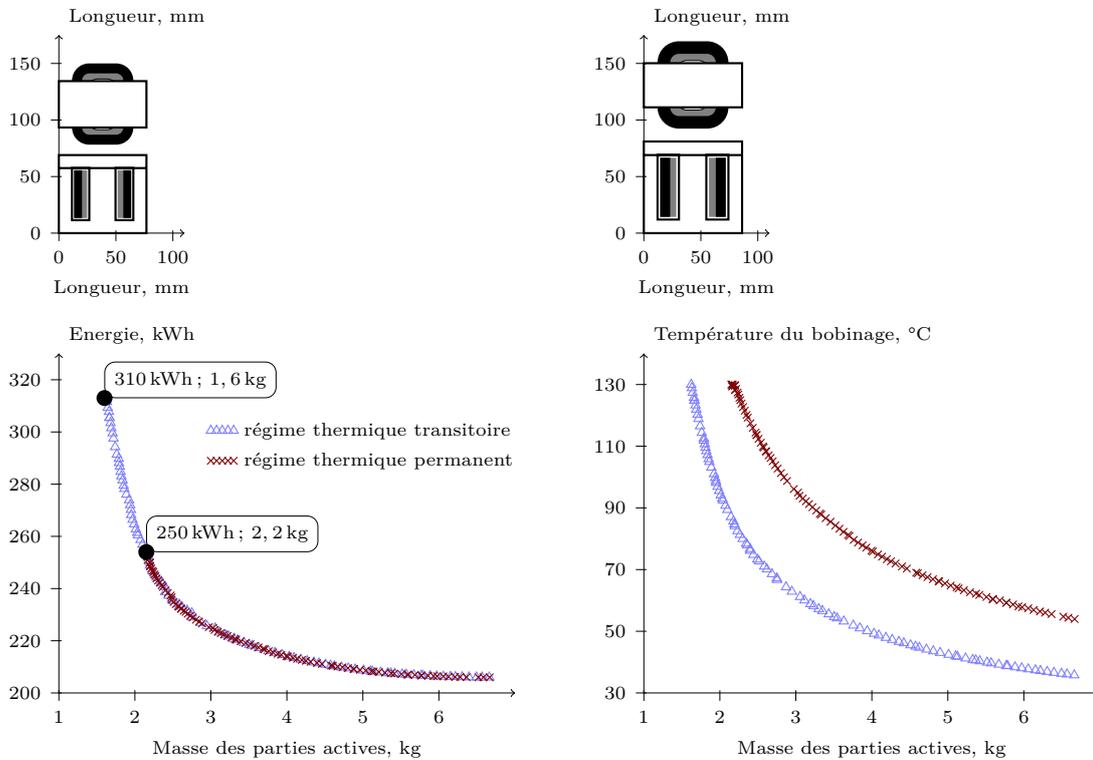


Figure 3.15 – Effet de la prise en compte de l’inertie thermique du transformateur dans son dimensionnement sur le front de Pareto est la température atteinte par le bobinage. Au dessus, structure de la solution de masse minimale, qui correspond à la butée de contrainte thermique. Puissance de charge de 200 W, utilisation du transformateur en régime thermique permanent 1 h par jour pendant sept ans.

Ces simulations sont obtenues pour une durée d’utilisation du transformateur d’une heure par jour, répétée sur sept ans. La non prise en compte de l’inertie du transformateur limite les solutions de masse minimale à une structure plus petite que celle obtenue lorsque la modélisation thermique prend en compte le régime transitoire. En effet, la structure de masse minimale représente dans les deux cas la solution qui atteint la butée en température. Pour des masses plus grandes, nous pouvons considérer que le transformateur est immédiatement à sa température de fonctionnement du fait de la superposition des fronts de solutions Pareto-optimales.

Nous remarquons ainsi que l’impact du modèle thermique se fait sur les solutions qui minimisent la masse et non l’énergie sur cycle de vie. Une conception qui privilégie ce second critère a de ce fait une plus grande latitude sur l’inexactitude de sa modélisation thermique.

Ainsi l'effet du régime thermique transitoire n'est pas prononcé sur ce modèle de transformateur. Les dimensions autorisées par les limites maximales des paramètres géométriques sont telles qu'il atteint rapidement sa température « normale » comme définie au Chapitre 2, section §6.1 page 58. Ainsi, la plupart des optimisations sont conduites en régime thermique permanent et sur une durée de fonctionnement suffisante pour que cette hypothèse soit valable.

3.2 Robustesse des résultats d'optimisation

Les résultats d'optimisation sont valables sur une certaine plage d'incertitude, du fait des grandeurs physiques utilisées pour représenter la réalité ou de la précision du modèle dans chacun des domaines physiques abordés. Faisant partie intégrante de l'analyse sur cycle de vie et des études de conceptions classique, l'analyse de la robustesse des résultats d'optimisation à différentes variations sur les données initiales du problème est un point fondamental que nous traitons dans cette section.

Les études de sensibilités présentées dans cette section sont effectuées sur un cycle de fonctionnement décrit par une puissance nominale de charge de 200 W et une durée de sollicitation de 5 h par jour sur sept ans. Ainsi il n'est pas nécessaire d'utiliser un modèle thermique en régime transitoire. Sur cette durée le transformateur, dans les limites géométriques qui sont imposées par les fourchettes sur les paramètres d'optimisation, atteint son régime thermique permanent.

3.2.1 Sensibilité aux données d'inventaire d'analyse sur cycle de vie

La première étude de sensibilité concerne les coûts énergétiques élémentaires utilisés pour quantifier la consommation d'énergie du transformateur au cours de sa vie, hors phase utile. Cette étude de sensibilité est justifiée par les remarques suivantes.

Tout d'abord, les optimisations incluent une projection sur sept ans. La modélisation du transformateur sur cycle de vie décrit son fonctionnement sur la durée de fonctionnement totale, pendant laquelle aucune des données utilisées ne varie, ce qui n'est pas le cas dans la réalité, les bases de données d'inventaire sur cycle de vie étant réactualisées environ tous les ans. De plus, comme nous l'avons précisé dans le premier chapitre, les données agrégées dans les bases de données d'inventaire d'analyse sur cycle de vie sont variables selon le pays, les techniques de mesures, les procédés mesurés, etc. Il est nécessaire de conserver un regard critique sur la justesse de leurs valeurs. Enfin, en supposant que ces coûts soient correctement quantifiés, il reste intéressant d'évaluer l'effort nécessaire à fournir sur l'amélioration d'un processus par rapport aux gains obtenus après optimisation. Il est possible par exemple qu'une réduction significative d'un coût énergétique n'ait au final que peu d'impact sur la distribution des solutions optimisées car cette réduction

est « noyée » dans les autres consommations énergétiques du transformateur sur son cycle de vie.

La sensibilité des résultats d'optimisation aux trois paramètres de coût énergétique élémentaire est considérée à la Figure 3.16 et à la Figure 3.17. Les coûts de production du cuivre et de fer sont tour à tour doublés et divisés par deux à la Figure 3.16 et le mix énergétique est changé de français à européen à la Figure 3.17. La différence entre ces deux figures se fait à travers la phase du cycle de vie sur lequel porte le coût énergétique. En effet, une variation du coût de production du cuivre ou du fer a une action sur E_{mat} alors qu'un changement du mix énergétique (utilisé pour ramener les pertes de fonctionnement en énergie primaire) a une action sur E_{fct} .

Nous constatons que l'impact des coûts énergétiques sur E_{accv} est différent. En effet, une action sur E_{fct} entraîne un décalage vers le bas de l'ensemble de la courbe du fait que les pertes de fonctionnement représentent un coût énergétique qui n'est jamais nul quelque soit la structure de transformateur sélectionnée sur les front Pareto-optimal. Par contre, une action sur E_{mat} peut ne pas avoir d'effet sur une partie du front de solutions Pareto-optimales initial, dans le cas des solutions de faible masse. Dans ce cas, plus les solutions ont une masse élevée, plus l'écart est important entre les résultats d'optimisation initiaux et ceux obtenus après modification des coûts énergétiques élémentaires de production.

Dans le cas d'une variation des coûts élémentaires énergétiques de production de matière, nous constatons de plus que l'écart entre les fronts de solutions Pareto-optimales au point d'énergie sur cycle de vie minimale se fait non seulement sur la valeur minimale d'énergie mais aussi sur la valeur maximale de masse atteinte. En effet, l'algorithme évolutionnaire a naturellement la possibilité d'aller chercher des solutions de masse plus élevée du fait que cette masse est « moins chère » énergétiquement parlant. Suivant le coût énergétique considéré, nous remarquons également que l'algorithme évolutionnaire ne va pas chercher aussi loin du point de vue de la solution des masses extrêmes.

Notons enfin dans ce cas de figure, l'impact plus important du coût énergétique de production du fer devant celui du cuivre sur les résultats d'optimisation. Cette différence se fait en rapport de la proportion des masses des deux constituants dans la masse totale, les deux coûts énergétiques étant relativement proches, se référer à la Table 3.1, page 76.

Dans le cas d'une variation des coûts élémentaires énergétiques de production d'électricité, la différence entre les courbes est indépendante de la masse à E_{mat} près, qui est proportionnel à une somme pondérée des masses de fer et de cuivre. A titre informatif, ce que le mix énergétique français perd sur le coût énergétique global sur cycle de vie par rapport au mix européen, il le gagne sur le potentiel de réchauffement climatique. En effet, une production d'électricité à plus de 80 % d'origine nucléaire permet à la France de rejeter moins de gaz à effet de serre, lors de la production d'électricité, que la moyenne européenne, selon les analyses actuelles sur cycle de vie, qui ne prennent pas forcément correctement en compte la fin de vie des centrales.

Coût énergétique de production du fer double
775 kWh ; 14,3 kg

Configuration initiale
700 kWh ; 19,5 kg

Coût énergétique de production du fer moitié
645 kWh ; 27,0 kg

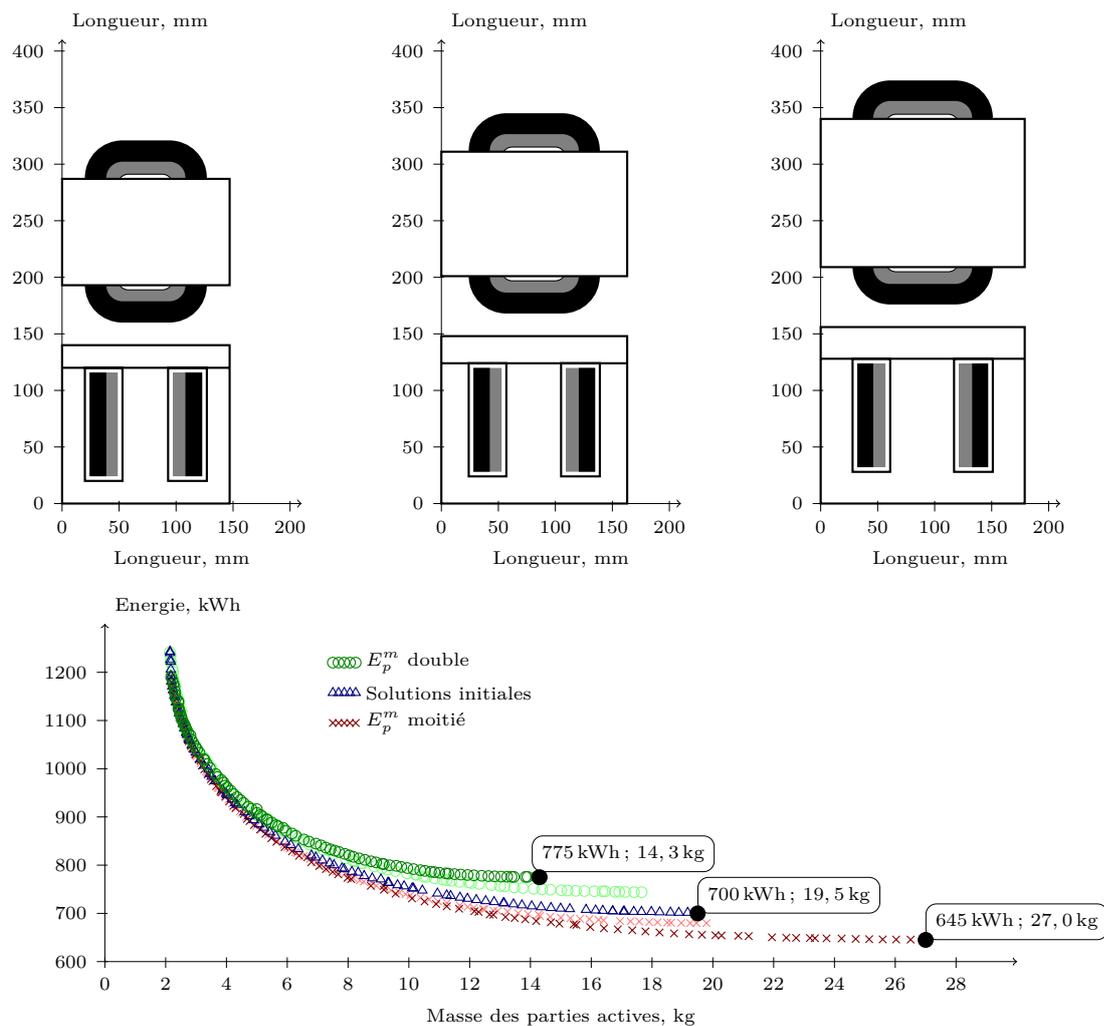


Figure 3.16 – Sensibilité des résultats d'optimisation aux coûts énergétiques élémentaires. Coût de production du cuivre (clair), coût de production du fer (sombre). Optimisation lancée sur 2000 générations de 100 individus. Puissance de charge de 200 W, utilisation du transformateur en régime thermique permanent 5 h par jour pendant sept ans.

Mix énergétique européen
620 kWh ; 17,4 kg

Mix énergétique français
700 kWh ; 19,5 kg

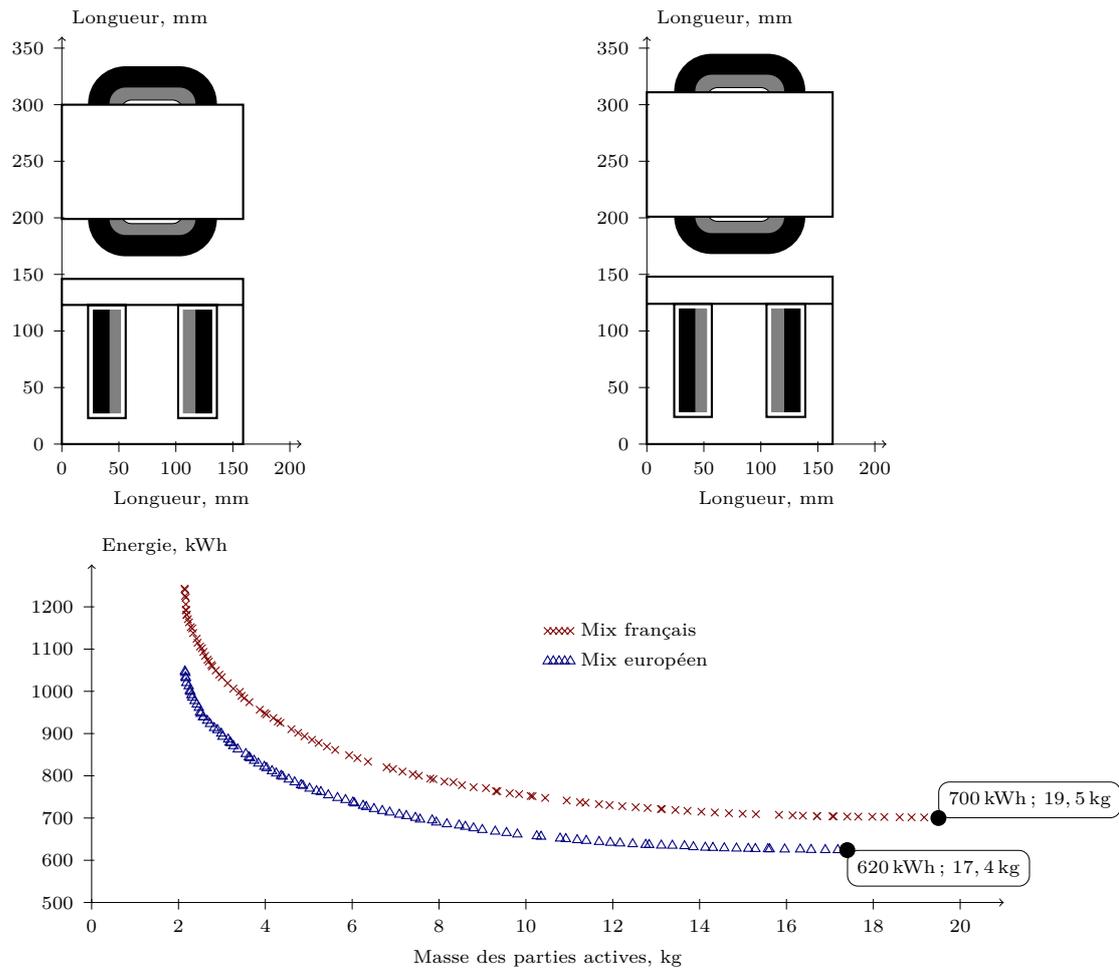


Figure 3.17 – Sensibilité des résultats d'optimisation aux coûts énergétiques élémentaires. Comparaison du mix énergétique français et européen. Optimisation lancée sur 2000 générations de 100 individus. Puissance de charge de 200 W, utilisation du transformateur en régime thermique permanent 5 h par jour pendant sept ans.

3.2.2 Sensibilité à un changement de matériau

Du point de vue de la production de matières premières, l'utilisation d'un kilogramme d'aluminium coûte plus cher à l'environnement qu'un kilogramme de cuivre, se référer à la Table 3.1. Ceci est d'autant plus vrai que les matériaux considérés ne sont pas d'origine recyclée. Nous choisissons ainsi de modéliser un transformateur dont le bobinage est en aluminium plutôt qu'en cuivre, afin de déterminer dans quelle mesure la différence de coût environnemental est pondérée par la différence des propriétés physiques, à service utile identique. Les fronts de solutions Pareto-optimales sont présentés à la Figure 3.18.

Bobinage en cuivre
1000 kWh ; 3,3 kg

Bobinage en aluminium
1000 kWh ; 5,5 kg

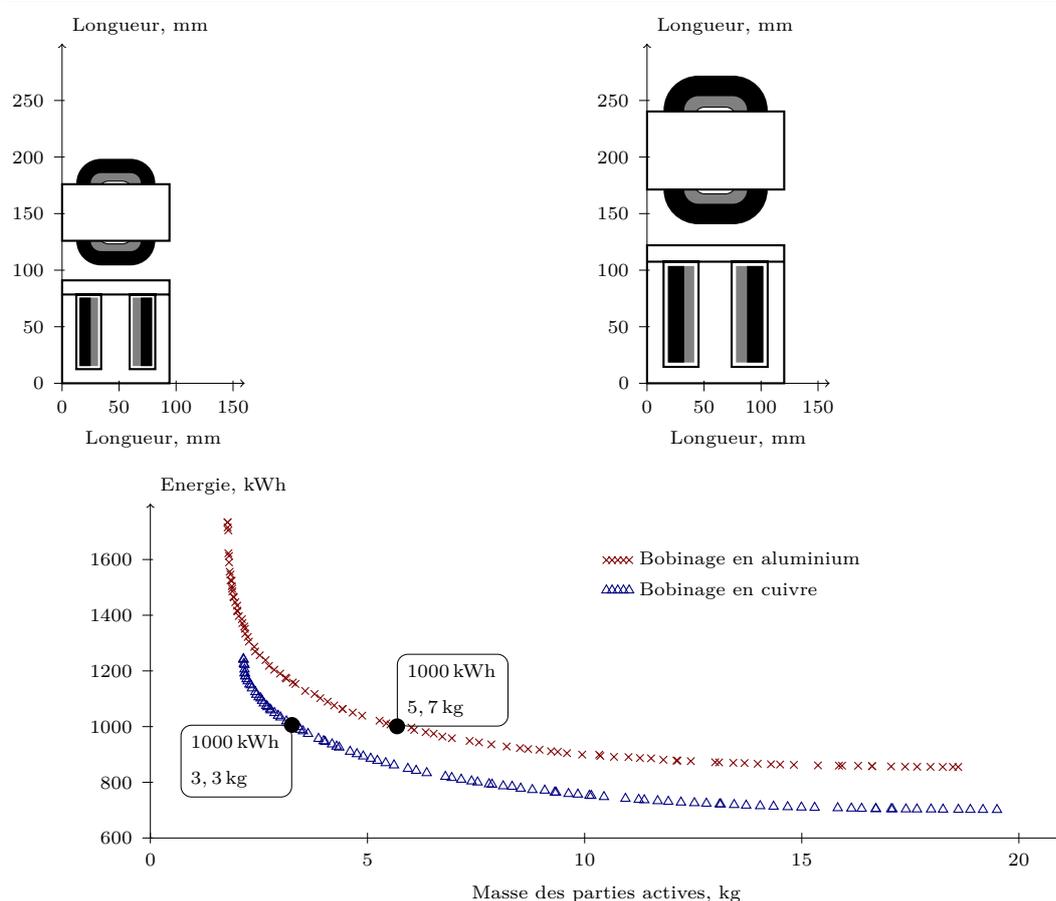


Figure 3.18 – Sensibilité des résultats d'optimisation au matériau de bobinage et exemple de structures à énergie globale sur cycle de vie identique. Optimisation lancée sur 2000 générations de 100 individus. Puissance de charge de 200 W, utilisation du transformateur en régime thermique permanent 5 h par jour pendant sept ans.

Le changement de matériau a une action sur l'ensemble du cycle de vie du produit. En effet, les coûts énergétiques de production du cuivre et de l'aluminium sont différents, ce qui impacte la phase de production (à masse identique, le coût énergétique est plus faible pour un bobinage en cuivre) et les propriétés physiques de l'aluminium donnent au transformateur des propriétés électriques et thermiques différentes, ce qui impacte la phase de fonctionnement (à masse identique, les pertes de fonctionnement sont plus élevées pour un bobinage en aluminium). Ainsi, la distribution des solutions se montre sensible au changement de matériau du bobinage, par contre le choix du bobinage en aluminium n'est pas à privilégier dans ce cas de figure. Dans cet exemple, le minimum d'énergie globale sur cycle de vie est atteint, dans le cas du bobinage en cuivre, pour une masse et un coût énergétique plus faibles qu'avec des conducteurs en aluminium.

A l'image de nouvelles solutions technologiques, les structures innovantes incluent différentes compositions de matières premières potentielles lors d'une étude d'éco-conception. Changer le cuivre du bobinage en aluminium ou utiliser un circuit magnétique à base de poudre ferromagnétique sont des exemples de ce que doit proposer une étude d'éco-conception des convertisseurs électromagnétiques.

3.3 Vieillessement du transformateur

Le vieillissement du transformateur introduit la notion de fin de vie anticipée dans la modélisation du cycle de vie du transformateur. Il s'agit donc d'un concept particulièrement important dans une conception qui modélise par projection la durée de vie totale de l'objet d'étude. En effet, un cahier des charges imposant une durée totale de fonctionnement de sept ans par exemple, ne prend pas en compte un éventuel remplacement du composant électrotechnique ou une réparation ponctuelle lors de défauts.

La prise en compte du vieillissement dans le dimensionnement du transformateur monophasé se base en première approximation sur un vieillissement en régime permanent des isolants, dû à la température « normale » de fonctionnement. Comme nous l'avons précisé au Chapitre 2, section §6.1 page 58, la durée de vie de l'isolant est pondérée d'un facteur dépendant de sa température de fonctionnement, exprimé sous la forme d'une exponentielle inverse de la température.

Par choix, les cycles de fonctionnement que nous imposons au transformateur ne sont pas variables en puissance nominale, nous n'avons donc pas de variation de sa température « normale » au cours de la durée de fonctionnement, en négligeant sa mise sous tension. Ainsi, dans le cadre d'utilisation du transformateur, ce type de vieillissement n'est pas utilisé.

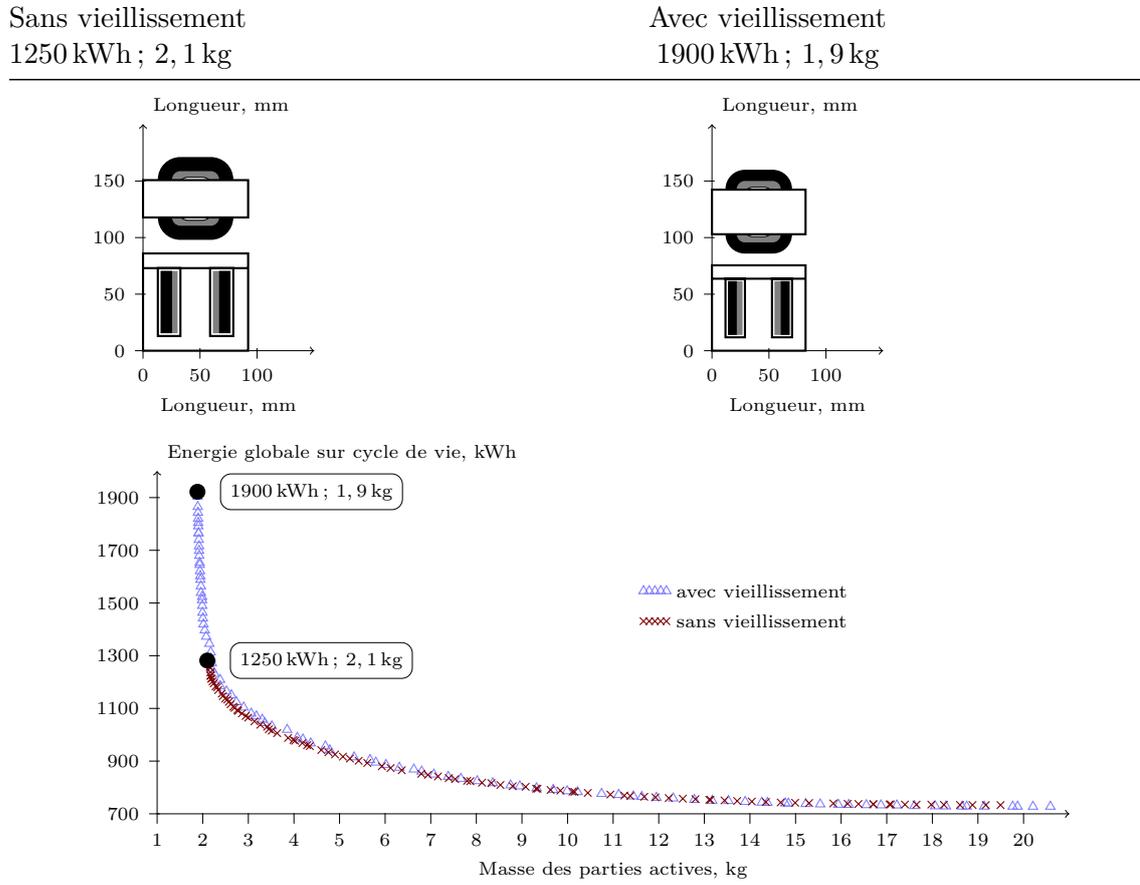
La prise en compte du vieillissement s'exprime ainsi sous la forme d'une diminution de la durée de fonctionnement effective du transformateur, qui nécessite donc autant de remplacements de la structure qu'il le faut pour assurer une continuité de service

lors de la durée totale d'utilisation (spécifiée dans le cahier des charges). Nous estimons ainsi un nombre de remplacements du transformateur N_r en fonction de sa température « normale » de fonctionnement qui implique un renouvellement de la structure, c'est à dire qui ajoute à nouveau à l'énergie globale sur cycle de vie les coûts énergétiques des phases du cycle de vie hors phase utile. Nous ne prenons pas en compte d'éventuelles réparations du transformateur, de fait, la loi de vieillissement inclut l'usure normale des isolants. L'expression modifiée de l'énergie globale sur cycle de vie, proposée à la (3.8), s'écrit donc :

$$E_{acv} = N_r * \underbrace{\left[\sum_m^p M_m E_{p,m}^m \right]}_{E_{mat}} + \underbrace{\int}_{\text{utilisation}} P_{fct} dt \text{ avec } N_r = f(\Delta\theta_b) \quad (3.12)$$

Nous raisonnons sur une « population représentative de transformateurs ». Ainsi le nombre de remplacements est une valeur réelle non entière. Comme nous l'avons précisé au Chapitre 2, section §6 page 57, une vision probabiliste de la durée de vie, si possible couplée à la durée d'usage (ce qui n'est pas le cas ici) représente un domaine de travaux innovants et fondamentaux dans la conception de structures selon des critères environnementaux sur cycle de vie.

La classification des isolants de bobinage assure, en moyenne, une durée de fonctionnement sans défaillance de 20000 heures à la température maximale admissible [TK04], soit 130 °C dans le cas d'un isolant de classe B. L'utilisation du transformateur cinq heures par jour pendant sept ans donne une durée cumulée d'utilisation d'environ 13000 heures. La vie du transformateur ne sera donc pas affectée par le vieillissement de son isolant si la température atteinte en régime permanent du bobinage reste inférieure ou égale à 130 °C (nous ne considérons pas dans cette étude d'autres mécanismes de vieillissement). La prise en compte du vieillissement permet par contre de libérer la contrainte thermique. Ainsi, dans cette optimisation, nous acceptons que le bobinage du transformateur dépasse la température maximale théorique admissible, mais ce dépassement de température implique un vieillissement accéléré des isolants, qui, s'il est trop important, entraînera un remplacement de la structure durant les sept ans d'usage prévus. Rappelons que d'après l'équation (2.1), au Chapitre 2 page 58, la durée de vie des isolants est divisée par deux tous les six degrés. Le front de solutions Pareto-optimales des résultats d'optimisation est présenté à la Figure 3.19.



Agrandissement sur les solutions de masse faible

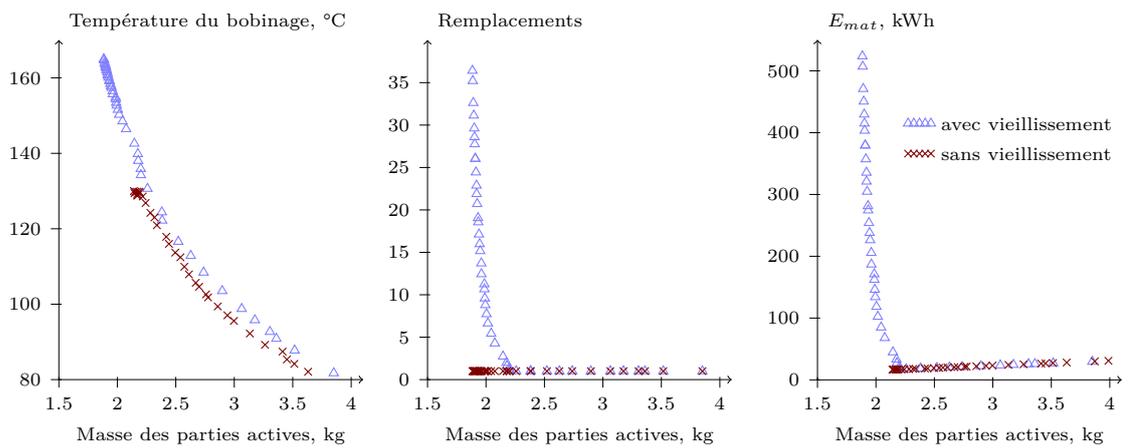


Figure 3.19 – Accumulation de vieillissement avec la température : répartition des solutions d’optimisations et contribution de $E_{mat.}$. Remplacements et température du bobinage en fonction de la masse des parties actives. Puissance de charge de 200 W, utilisation du transformateur en régime thermique permanent 5 h par jour pendant sept ans.

Il apparaît un accroissement significatif de la proportion de E_{mat} dans E_{acv} pour les structures de masses faibles. Ceci est lié à l'accroissement de la température des bobinages, qui augmente d'autant plus que la masse du transformateur est faible, à service utile identique. Habituellement, dans cette région de l'espace des objectifs E_{mat} n'est pas prépondérante devant E_{fct} dans E_{acv} . Ce changement entraîne une montée nette du front de solutions Pareto-optimales dans le cas des structures de masse faible. Nous proposons à la Figure 3.19 une comparaison entre les résultats d'optimisation avec ou sans prise en compte du vieillissement des isolants sur un cycle de fonctionnement de 5 h par jour. Nous traçons notamment le nombre de remplacements nécessaires du transformateur sur sa durée totale d'utilisation en fonction de la masse active des solutions et le mettons en relation avec la température maximale atteinte par le bobinage. Dans ces conditions, à service utile identique, plus la structure de transformateur est légère plus sa durée de vie effective est faible, impactant de plus en plus l'environnement. Enfin nous proposons la répartition de la contribution de E_{mat} dans l'énergie globale sur cycle de vie pour les deux types d'optimisations.

La comparaison des deux structures de masse minimale nous permet de vérifier que les paramètres sont très proches. En effet, le remplacement d'un transformateur ne joue que sur la contribution E_{mat} dans l'énergie globale sur cycle de vie. Remarquons à ce propos que l'objectif de la masse des parties actives n'est plus représentatif de l'impact environnemental de la consommation de ressources en matières premières. En effet, nous représentons toujours la masse d'un seul transformateur, et non la masse de l'ensemble des transformateurs utilisés sur la durée totale d'utilisation.

Les résultats d'optimisation sont identiques lorsque qu'il n'y a pas de remplacement du transformateur durant son utilisation. Ainsi, la prise en compte de ces effets permet d'atteindre des solutions de masse plus faible mais plus coûteuses à l'environnement (au moins du point de vue des ressources en énergie primaire) et ne modifie pas la répartition des solutions de plus forte masse comme le fait par exemple un changement du mix énergétique ou une variation des coûts de production. En effet, les solutions d'énergie sur cycle de vie minimale ne sont pas modifiées par un vieillissement thermique basé sur la température maximale atteinte par le bobinage. La prise en compte d'autres types de vieillissements (mécanique, électrique ou en régime thermique transitoire par exemple) auraient eu un impact sur le placement de ces solutions dans l'espace des objectifs.

Conclusion

Ce chapitre présente une première étude d'optimisation de composant électrotechnique sur cycle de vie, avec comme critère principal d'optimisation l'énergie globale sur cycle de vie. Le modèle retenu pour mettre en place les premières conclusions est celui d'un transformateur monophasé, alimenté par une tension et une fréquence fixes. Souhaitant opposer au critère de minimisation de l'énergie sur cycle de vie un critère classique de

conception qui rejoint toutefois un objectif environnemental, nous avons choisi la masse totale des parties actives. Ces optimisations sont effectuées sous contrainte thermique (température du bobinage) et sous contrainte d'induction maximale.

Le type d'optimisation mené dans ce chapitre n'est pas très différent d'une optimisation sur critères économiques, les principes de calculs étant identiques. En effet, l'utilisation de l'analyse sur cycle de vie dans notre modélisation se limite à un seul critère sur cycle de vie, qu'il est donc possible d'exprimer dans l'unité de notre choix, euros ou kilowattheures par exemple. La principale différence est dès lors liée au couplage du vieillissement et de la durée de vie au travers du calcul de température du bobinage dans notre cas de figure. Une modélisation plus poussée (faisant par exemple intervenir la durée d'usage plutôt que la durée de vie, la prise en compte de contraintes de démontages, etc.) éloignerait les résultats d'optimisation sur cycle de vie d'optimisations sur critères strictement économiques.

Au fonctionnement du transformateur, défini sur une journée puis répété sur sept ans, s'ajoute le volet d'analyse sur cycle de vie dont l'importance varie suivant l'activité du transformateur. Ainsi l'éco-conception passe impérativement par une reproduction complète de la phase d'activité, mais son intérêt devant une conception plus classique dépend aussi entièrement de cette phase d'utilisation. Il apparaît ainsi que le taux d'utilisation, défini comme le ratio fonctionnement- inactivité au Chapitre 2, section §5 page 55, est bien un qualificatif notable de l'action des critères environnementaux sur les résultats de conception. La prise en compte de l'énergie sur cycle de vie nous permet de conclure que les applications principalement concernées par la minimisation de l'énergie sur cycle de vie présentent des fonctionnements impulsionsnels, c'est-à-dire une utilisation brève, mais répétée (par exemple de façon aléatoire). En effet, dans le cas d'un taux d'utilisation très faible il suffit de minimiser la masse sous contrainte de satisfaction du service utile. Dans le cas d'un fort taux d'utilisation, les pertes de fonctionnement sont prépondérantes et rendent les résultats d'éco-conception trop proches de ceux d'une conception classique (minimisation des pertes) pour justifier l'utilisation de critères environnementaux.

La prise en compte du cycle de vie pour l'estimation de la consommation d'énergie du transformateur implique une diminution progressive des masses maximales accessibles par optimisation, au fur et à mesure de la prépondérance de E_{mat} dans E_{acv} . En effet, les deux contributions à l'énergie globale sur cycle de vie sont contradictoires. Ainsi dans les cas extrêmes, minimiser les pertes de fonctionnement du transformateur maximise ses autres coûts énergétiques sur cycle de vie.

Nous proposons ensuite une étude de sensibilité des résultats d'optimisation aux variables de simulation. Il apparaît alors que la distribution des résultats est sensible dans des proportions différentes aux coûts énergétiques suivant la phase du cycle de vie qu'ils concernent. L'allure des fronts de solutions Pareto-optimales varie ainsi suivant la variable à l'origine de l'étude de sensibilité. Ces études de sensibilité concernent les coûts énergétiques élémentaires de production de matière première et d'énergie ainsi que le matériau constitutif du bobinage.

La prise en compte du régime transitoire thermique est ensuite proposée. En effet, les composants électrotechniques présentant des cycles de fonctionnement brefs peuvent avoir une grande sensibilité aux critères énergétiques. Il apparaît que la modélisation thermique en régime transitoire permet d'atteindre des solutions de masse plus faible sur le front de solutions Pareto-optimales. Nous avons ainsi noté que l'impact de la modélisation thermique ne se faisait pas sur le point d'énergie globale sur cycle de vie minimum.

Enfin nous avons terminé ce chapitre par la prise en compte du couplage de la durée de vie aux dimensionnements en considérant le vieillissement des isolants en régime permanent thermique. L'impact le plus fort se situe dans la zone des solutions de faible masse où la température maximale atteinte par le bobinage est la plus élevée. La prise en compte du vieillissement libère ainsi l'optimisation de la contrainte thermique, la durée d'utilisation imposant un certain nombre de remplacements du transformateur sur la durée d'usage.

Moteur asynchrone monophasé à fonctionnements brefs

Introduction

Comme nous l'avons vu précédemment, une machine de faible puissance prévue pour des fonctionnements courts présente a priori un fort potentiel de sensibilité à une conception sur critères environnementaux. C'est pourquoi nous dirigeons nos travaux vers cette catégorie de moteurs, concrétisée, dans ce chapitre, par un modèle de machine asynchrone à alimentation monophasée à condensateur permanent. En effet, le moteur asynchrone à cage d'écureuil coulé en aluminium représente un exemple typique de moteur produit en grande série. Ce type de moteurs présente ainsi une niche potentielle de réduction des impacts environnementaux significative. De plus, par l'intermédiaire d'une collaboration avec la société SOMFY [SOM] intéressée par un travail prospectif sur l'impact environnemental de certains de leur moteurs, nous avons accès à une application réelle et commercialisée de moteur domotique présentant les caractéristiques de fonctionnement décrites ci-dessus.

Notons que ces moteurs sont destinés à des applications dans le bâtiment, permettant à long terme une gestion améliorée de l'interaction des bâtiments avec leur environnement, notamment à travers l'optimisation de leur bilan énergétique [ADE09]. Ces considérations rejoignent nos préoccupations environnementales à une plus grande échelle et dans un

domaine différent (bâtiments automatisés en fonction de la météorologie) soulignant le large spectre de domaines techniques susceptibles d'intervenir dans une meilleure gestion environnementale de notre société.

1. Modélisation du moteur

1.1 Description du moteur

Le moteur décrit dans ce chapitre est le composant actif d'un dispositif d'entraînement électrique destiné aux produits légers du bâtiment constitués sous la forme d'actionneurs tubulaires pour produits enroulables comme les volets roulants, les stores de terrasse, les portes de garage, etc.



Figure 4.1 – Vue éclatée d'un actionneur tubulaire intégrant le moteur objet de l'étude.

Ces moteurs sont conçus de manière à être insérés à l'intérieur du tube d'enroulement du produit considéré, qu'ils entraînent ensuite en rotation. Les temps de sollicitation typiques sont très courts, ne dépassant pas la trentaine de secondes. De ce fait, la durée cumulée de fonctionnement de l'actionneur est de moins de dix heures par an, ce qui conduit à un dimensionnement particulier favorisant le couple plutôt que le rendement sur cycle de fonctionnement. A l'intérieur d'un tube en acier les éléments suivants sont disposés [Gre95] :

Le moteur électrique - Le seul objet considéré dans cette étude.

Le frein d'immobilisation associé au moteur - Les moteurs sont obligatoirement munis d'un système de blocage à l'arrêt évitant l'entraînement par le poids de la charge. Le principe est de dériver une partie du flux statorique pour attirer contre le rotor un plateau mobile en fer dont la deuxième face est plaquée au repos contre un matériau de friction par un ressort, se référer à la Figure 4.4.

Le réducteur - Il permet d'obtenir sur le tube d'enroulement un couple élevé (une dizaine de Newton-mètres) et une faible vitesse de rotation (comprise entre 10 et 30 tours par minute).

Dispositif de comptage - Il permet, après un réglage initial, la coupure de l'alimentation du moteur quand le produit entraîné atteint ses positions haute et basse.

Carte électronique - Celle-ci est présente lorsque le système dispose d'une télécommande.

Condensateur de déphasage - Selon le sens de rotation désiré à un instant donné, le condensateur de déphasage est placé en série avec l'un ou l'autre des enroulements. la capacité est calculée afin d'obtenir un champ inverse le plus faible possible au fonctionnement nominal. Notons que la tension aux bornes du condensateur varie avec la vitesse de rotation.

Nous proposons à la Figure 4.2 plusieurs vues du moteur. Notons que ce moteur présente une longueur active significative devant son diamètre extérieur. Il s'agit en effet d'un des seuls paramètres permettant de satisfaire les contraintes de dimensionnement en couple et thermiques sous la contrainte d'intégration dans le tube d'enroulement spécifique à l'application entraînée.

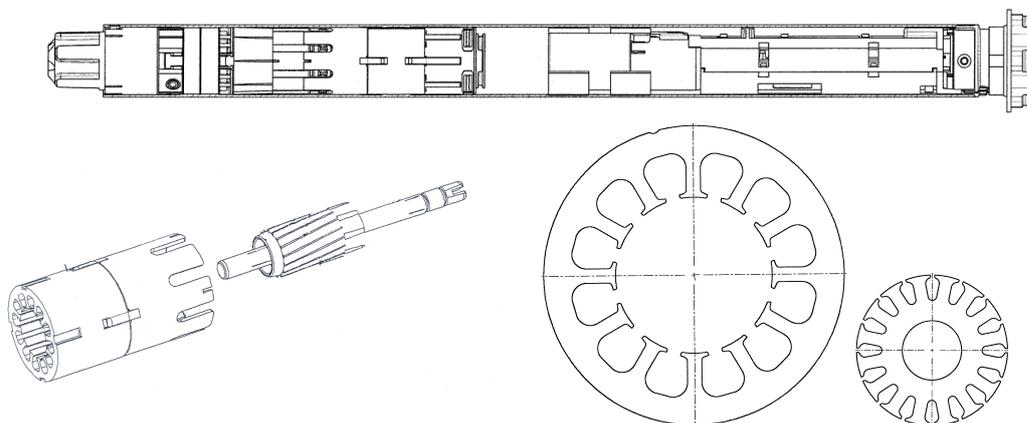


Figure 4.2 – Composants de l'actionneur tubulaire, parties actives et section de découpage des tôles du circuit magnétique.

Ce moteur est alimenté à fréquence fixe, sur une application dont la vitesse varie peu. Il n'y a donc pas d'intérêt spécifique, dans ce cas, à ajouter l'optimisation du réducteur hormis du point de vue mécanique (choix de construction ayant un impact environnemental

différent). Dans un cas moins spécifique de machine asynchrone, cette question aurait tout à fait pu être envisagée.

1.2 Restrictions de l'étude

La construction du moteur à proprement parler est découplée des autres éléments de l'actionneur incluant le réducteur, la carte électronique et les autres parties mécaniques (dont le tube) du fait d'une construction modulaire très optimisée d'un point de vue économique. Nous limitons donc notre étude au calcul de l'énergie globale sur cycle de vie et du potentiel de réchauffement climatique des seules parties actives du moteur. En effet, les coûts environnementaux des autres constituants de l'actionneur tubulaire (carte, réducteur, etc.) et de la consommation de vieille sont indépendants du moteur considéré dans cette gamme de produit, disparaissant donc lors de la comparaison des écobilans (cela élèverait juste les fronts de solutions Pareto-optimales d'une même valeur d'énergie globale sur cycle de vie ou de potentiel de réchauffement climatique quelle que soit la masse considérée).

Deux contraintes géométriques majeures sont appliquées au dimensionnement de la machine. Tout d'abord le diamètre extérieur ne peut pas varier du fait de la normalisation du tube d'enroulement des éléments roulants. Ainsi ce type de machine est proposé pour un couple nominal à un diamètre extérieur donné. D'autre part, le dessin des tôles est fixé par les processus de fabrication mis en place et externalisé en sous-traitance. Une modification de la section active est suffisamment coûteuse en terme de répercussions sur la chaîne de production pour n'être pas considérée ici. La valeur de la capacité est adaptée au moteur considéré pour obtenir un couple de démarrage suffisant. Seuls la longueur active et le nombre de spires par phase peuvent être modifiés, ce qui donne deux paramètres d'optimisation. Augmenter le couple nécessite d'augmenter la longueur active.

Le moteur considéré présente une paire de pôles et deux phases, 12 encoches au stator et 16 au rotor. Les deux bobinages sont distribués pour donner naissance à un champ tournant bipolaire. Afin de permettre un fonctionnement identique dans les deux sens de rotation les deux enroulements sont identiques.

1.3 Calcul de masse

Nous définissons S_{cm} la section du circuit magnétique, S_{es} et S_{er} la section des encoches statoriques et rotoriques, N_s et N_r le nombre d'encoches au stator et au rotor, L_a la longueur active de la machine, D_{tb} et D_{acc} le diamètre moyen des têtes de bobine et des anneaux de court-circuit, k_r le coefficient de remplissage du cuivre dans les encoches statoriques, k_{lam} le coefficient de foisonnement de l'empilement de tôles, ρ_c , ρ_{al} et ρ_f

la masse volumique respectivement du cuivre de l'aluminium et du fer. Le coefficient de remplissage du cuivre dans les encoches est pris constant dans cette étude.

Les masses des trois constituants actifs de la machine (M_b pour la masse du bobinage incluant les têtes de bobines, M_c pour celle de la cage incluant les anneaux de court-circuit et M_{cm} pour celle du circuit magnétique) permettent d'écrire l'expression de la masse totale des parties actives de la machine asynchrone.

$$M_{act} = M_b + M_c + M_{cm} \text{ avec } \begin{cases} M_{cm} = \rho_f S_{cm} L_a k_{lam} \\ M_b = \rho_c k_r S_{es} [N_s L_a k_{lam} + 2\pi D_{tb}] \\ M_c = \rho_{al} S_{er} [N_r L_r + 2\pi D_{acc}] \end{cases} \quad (4.1)$$

Ainsi la masse des parties actives est proportionnelle à la longueur active de la machine, aux têtes de bobines et anneaux de court-circuit près, comme présenté à la Figure 4.3. Lorsque nous présenterons des résultats en fonction de la masse des parties actives, il faudra avoir à l'esprit que ceci est corrélé à la variation de la longueur active.

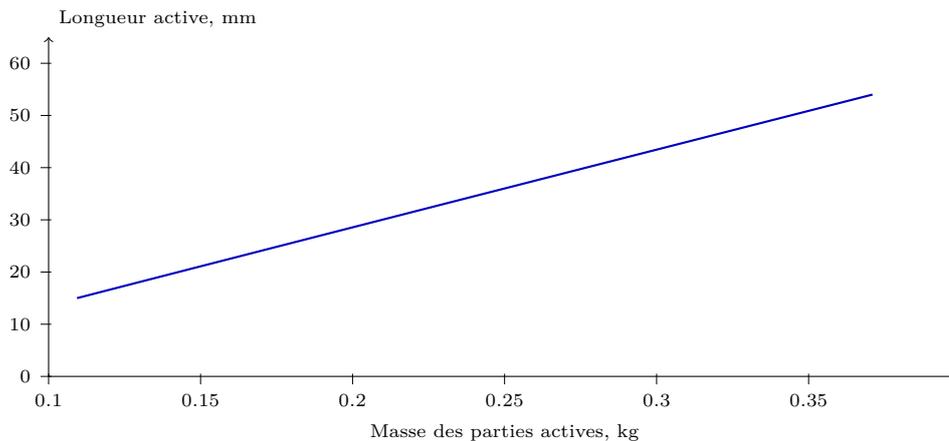


Figure 4.3 – Masse en fonction de la longueur active.

1.4 Modélisation électrique

1.4.1 Comportement magnétique du moteur

Les contraintes de fonctionnement spécifiques de cette machine donnent des résultats qui s'éloignent significativement de l'électrotechnique traditionnelle présentant ainsi une modélisation spécifique. Tout d'abord, le moteur est très saturé lors de son utilisation, sur

des cycles de fonctionnement spécifiques (se référer à l'évolution du couple, présenté à la Figure 4.13). De plus, il est le siège d'importants effets 3D. Aux dimensions importantes du paquet de tôles s'ajoutent en effet des têtes de bobines de près de 50 mm pour des moteurs dont la longueur active est comprise entre 30 et 100 mm. De plus, un frein dérive une partie du flux statorique sans contribuer à la production du couple. Nous constatons aussi que pour forcer un flux suffisant à passer à travers la bague du frein plutôt que directement à travers le rotor, ce dernier est découpé par des entrefers radiaux. Enfin le condensateur de déphasage est connecté en permanence sur la phase auxiliaire. Une coupe des parties actives de la machine est proposée à la Figure 4.4.

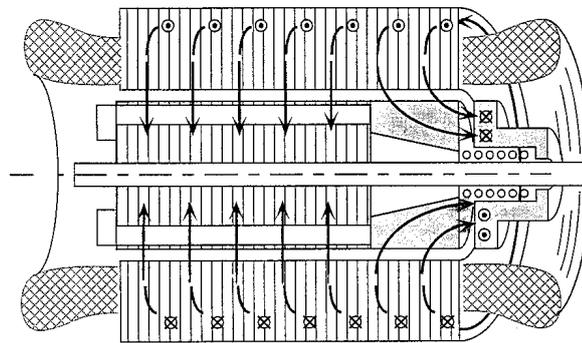


Figure 4.4 – Coupe des parties actives du moteur et du fonctionnement du frein rotorique (document interne SOMFY).

1.4.2 Choix de modélisation

L'expérience de SOMFY en matière de modélisation de ses moteurs monophasés d'entraînement de volets roulants a montré qu'une approche analytique était difficile sinon impossible. Les seuls modèles suffisamment fidèles, tout en nécessitant des « réglages » a posteriori, sont obtenus par éléments finis en magnétodynamique avec rotation du rotor et couplage aux équations électriques. Le temps de résolution de ces modèles est strictement prohibitif en vue d'une exploitation dans le cadre d'une optimisation.

Bien que ces considérations rendent une modélisation linéaire analytique de la machine non appropriée, le temps de calcul d'un modèle analytique est un atout considérable dans une boucle d'optimisation par algorithme évolutionnaire. Le gain de temps qui en résulte est suffisant pour nous faire envisager dans un premier temps une modélisation analytique linéaire du moteur en présence du condensateur de déphasage. Cette modélisation n'a finalement pas été exploitée dans le cadre des optimisations car les résultats obtenus étaient trop éloignés des mesures. Nous présentons à titre indicatif cette modélisation en Annexe D, page 225.

Nous nous tournons donc vers les éléments finis magnétodynamique 2D par l'intermédiaire du logiciel FEMM [FEM] offrant un compromis satisfaisant entre le temps de calcul et la précision des résultats par rapport à une modélisation éléments finis 3D. Le tracé de la machine sous FEMM est proposé à la Figure 4.5.

La modélisation par éléments finis 2D sous FEMM présente toutefois quelques spécificités. En effet, le logiciel FEMM ne permet de simuler que des configurations mécaniquement statiques. Plutôt que de modéliser directement le comportement de la machine, nous déterminons ses caractéristiques en rotation et en charge à travers une série de simulations pour différentes configurations statiques. Chaque pas de simulation étant effectué à vitesse de rotation mécanique nulle, nous alimentons le stator non plus à la pulsation statorique du modèle analytique, mais à la pulsation rotorique, différence entre la pulsation statorique et la vitesse de rotation du rotor. Notons aussi que le logiciel FEMM ne traite que les problèmes dont l'alimentation est en courant. Afin de modéliser une application alimentée en tension, comme le moteur considéré ici, une étape supplémentaire de conversion courant-tension est nécessaire. Nous précisons ce point à la section §1.5.4, page 119.

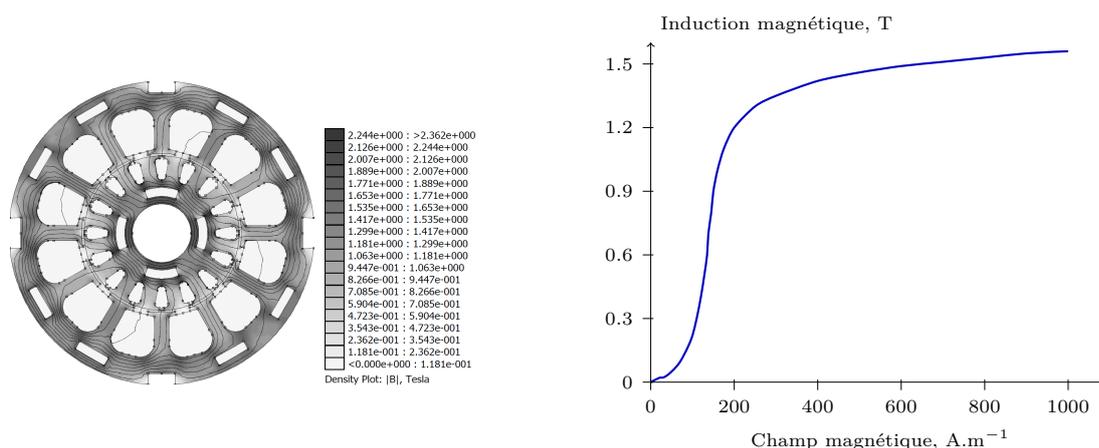


Figure 4.5 – Tracé de la machine asynchrone par élément finis, lignes de champ et caractéristique magnétique des tôles utilisée dans la modélisation éléments finis.

La prise en compte du frein est effectuée dans nos simulations en diminuant la longueur active réelle de la machine de la longueur de la bague de frein. En effet, cette partie du rotor ne participe pas à la création du couple utile. Nous avons de plus ajouté au dessin de la machine les zones d'agrafes au rotor et au stator.

1.5 Mise en place du modèle

1.5.1 Calcul du couple

Ce calcul est fait directement par éléments finis grâce à la formulation du tenseur de Maxwell. Le calcul par éléments finis sous FEMM est réalisé pour une configuration mécanique donnée (à rotor bloqué). Suivant la position des encoches rotoriques par rapport aux encoches statoriques, le couple de réluctance est non négligeable dans la configuration des machines simulées. Or sa valeur moyenne est nulle en première approximation (nous ne prenons pas en compte les effets de la modulation du champ dans l'entrefer sur les courants induits dans la cage). Afin de s'affranchir de l'effet de denture, nous calculons donc le couple pour chaque configuration d'alimentation pour différentes configurations statiques de la machine. Du fait de la présence d'agrafes au rotor, il faut le tourner de 90° pour qu'il retrouve une configuration physiquement identique. Nous calculons ainsi le couple sur six pas de discrétisation de cet angle (soit tous les 15°). La moyenne des valeurs de couple obtenues est ensuite gardée comme valeur de couple développé par le modèle de moteur pour la configuration d'alimentation en cours.

1.5.2 Validation expérimentale

Des relevés expérimentaux effectués pour différentes valeurs de la longueur active nous permettent de valider le modèle éléments finis. Nous disposons en effet de mesures pour une demi-douzaine de longueurs actives de moteurs différentes (35, 40, 55, 70, 80, 100 et 105 mm). Les comparaisons portent à chaque fois sur chacune de ces longueurs actives.

Les courbes expérimentales sont obtenues lors d'essais automatisés sur une durée d'une vingtaine de secondes environ. Toutes les mesures sont réalisées sur le moteur seul. En effet, elles sont destinées à caractériser le moteur sans les perturbations mécaniques apportées soit par le réducteur, soit par une charge quelconque. Un moteur Brushless sert de charge. Une dizaine de mesures de couple sont effectuées au couple-mètre pour des vitesses réparties entre la vitesse de synchronisme (premier point de mesure) et l'arrêt du moteur (dernier point de mesure). Les mesures sont moyennées sur une durée de deux secondes environ pour obtenir une valeur de couple lissée (les moteurs peuvent présenter une ondulation de couple significative, dépassant les 100%). La durée totale de l'essai étant d'une trentaine de secondes, le moteur n'a pas le temps de beaucoup chauffer. Les données électriques mesurées sont les courants absorbés par les deux phases, la tension à leurs bornes ainsi qu'à celle du condensateur de déphasage, la résistance des bobinages statoriques. Le bilan des pertes de fonctionnement est effectué par calcul à partir de ces données.

Dans un premier temps nous alimentons les phases principale et auxiliaire du modèle éléments finis avec les courants absorbés par les phases principale et auxiliaire de

la machine expérimentale (amplitude et déphasage). Nous proposons à la Figure 4.6 une comparaison de deux relevés expérimentaux et les calculs éléments finis correspondants. Nous ajoutons sur cette figure les calculs éléments finis sans prise en compte de la saturation magnétique. Nous constatons que la saturation magnétique des tôles a une incidence significative sur les courbes de couple.

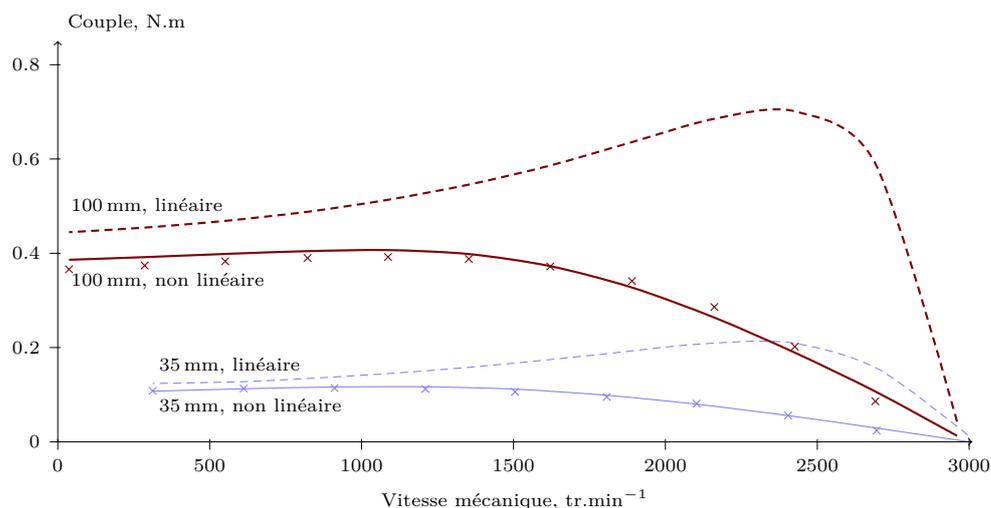


Figure 4.6 – Comparaison des relevés expérimentaux (points) et des calculs par éléments finis avec ou sans prise en compte de la saturation (respectivement trait plein et pointillé) sur le couple et la tension pour une machine de 35 mm de longueur active (clair) et 100 mm de longueur active (sombre). Le modèle éléments finis est alimenté par les courants principal et secondaire (et leur déphasage) relevés expérimentalement.

Pour le premier point de mesure, le moteur est à la température ambiante. Pendant ces essais la température du bobinage croît, entraînant une augmentation de la résistivité du cuivre des bobinages et de l'aluminium des conducteurs rotoriques. Cette variation de résistivité est prise en compte lors des simulations afin de comparer dans les meilleures conditions possibles les résultats du modèle par éléments finis. Pour ce faire, nous calculons l'élévation de température du bobinage et de la cage (en régime transitoire thermique sous l'hypothèse d'un échauffement adiabatique) à partir de l'intégrale des pertes de fonctionnement du moteur sur les deux secondes séparant chaque point de mesure.

1.5.3 Alimentation de la machine

Le modèle éléments finis est alimenté en courant alors que la machine réelle est alimentée en tension avec un condensateur connecté en permanence en série avec la phase auxiliaire. Nous avons envisagé plusieurs choix de modélisation. Le premier consiste à « alimenter » le modèle éléments finis avec des courants en quadrature d'amplitude identique, ce qui permet une modélisation à partir de la seule connaissance de l'amplitude du courant

dans la phase principale. Nous calculons ensuite la tension d'alimentation de la machine à partir des courants d'alimentation, comme présenté à la section §1.5.4, page 119.

Le second choix consiste à alimenter la machine avec des courants déséquilibrés. Il faut donc introduire en plus de l'amplitude du courant de la phase principale celle du courant de la phase auxiliaire ainsi que leur déphasage. La relation entre les deux courants doit être calculée à partir de la valeur du condensateur de déphasage (qui varie avec le moteur considéré) et de l'impédance de la machine. Ce choix introduit donc trois paramètres supplémentaires dans la modélisation et implique de traiter différemment la phase auxiliaire de la phase principale lorsqu'il faut remonter aux tensions d'alimentation depuis les densités de courant du modèle éléments finis.

Dans ces deux premiers cas, une modélisation en courants non sinusoïdaux n'est pas envisageable car la modélisation en magnétodynamique exige des excitations sinusoïdales. Le dernier choix consiste à modéliser directement une machine alimentée en tension par éléments finis sur un logiciel offrant la possibilité d'établir un couplage électrique aux simulations éléments finis. Nous nous sommes alors tournés vers le logiciel d'éléments finis COMSOL [COM]. Bien que présentant un intérêt de modélisation certain, ce choix n'a pas pu être mené à terme par manque de temps. En gardant à l'esprit que cette modélisation est prévue pour conduire des optimisations, nous avons de plus noté que les temps de simulations dans ce dernier cas étaient nettement plus importants que dans les simulations menées sur le logiciel FEMM. De plus, nous aurions sans doute été confrontés à des difficultés en situation d'optimisation (difficultés pratiques de mise en place des simulations en plus des temps d'optimisation).

Nous choisissons de nous concentrer sur le premier choix d'alimentation pour plusieurs raisons. La première raison est un constat expérimental sur les moteurs modélisés. Ces moteurs de petite puissance prévus pour des utilisations très courtes présentent en effet une résistance statorique élevée (elle varie entre 320 et 100 Ω pour des moteurs dont la longueur active varie respectivement entre 55 et 105 mm). De plus, la valeur de l'inductance magnétisante est affaiblie par un fort niveau de saturation. Ces caractéristiques masquent les effets de la variation de la vitesse de rotation (et du glissement) sur l'impédance globale de la machine qui reste alors quasi-constante lors de son utilisation.

De ce fait, avec un condensateur de déphasage unique, il est possible d'obtenir des courants diphasés relativement bien équilibrés et sinusoïdaux (malgré la saturation et grâce à la résistance statorique élevée) sur une large plage de vitesse (expérimentalement entre 2000 et 3000 tours par minute, plage dans laquelle nous situons nos optimisations). Les résultats de mesure confirment ces remarques théoriques, comme présenté à la Figure 4.7 sur un moteur de 70 mm de longueur active à condensateur de 5,5 μF et à alimentation monophasée, où nous constatons que les deux courants restent assez bien équilibrés. Nous observons également expérimentalement, principalement à cause de la résistance statorique élevée, que les courants restent bien de forme sinusoïdale (non représentés ici).

La seconde raison de ce choix s'explique par des considérations sur les optimisations menées plus loin. En effet, comme nous l'expliquons plus en détail à la section §2.4.1 page 125, nous avons choisi de constituer une base de donnée par calculs systématiques pour tous les calculs par éléments finis. Le nombre limité de paramètres qui en résulte est donc un plus. Seuls la longueur active et le nombre de spires varient. La section des conducteurs également mais elle est directement liée à N_{sp} car nous travaillons à coefficient de remplissage d'encoche constant.

Dans ce contexte de paramétrisation du moteur, le calcul par éléments finis en 2D à alimentation en courant (à ce stade de la modélisation les effets 3D ne sont pas pris en compte) peut être mené pour une seule longueur de machine, toutes les grandeurs étant alors proportionnelles à la longueur active, à force magnétomotrice et fréquence donnée. Un traitement direct de l'alimentation en tension, que ce soit pour calculer un déséquilibre sur les courants ou dans le cas de l'alimentation en tension directement, invalide cette propriété, multiplie le nombre de simulations par autant de longueurs actives que nous discrétisons le paramétrage d'optimisation. Ceci est dû au fait que le moteur ne travaille pas à flux forcé. Enfin, un calcul systématique prenant en compte le déséquilibre des courants ajoute d'autant plus de configurations à simuler qu'il y a d'amplitudes de courants principal et secondaire, de déphasages et de valeur du condensateur de déphasage.

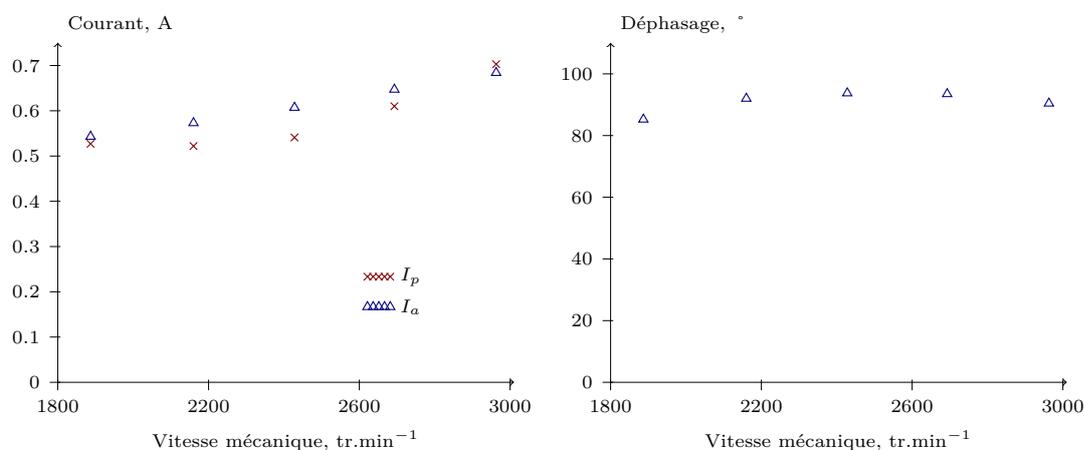


Figure 4.7 – Amplitude et déphasage entre les courants principaux et secondaires entre 2000 et 3000 tours par minute pour un moteur de 70 mm de longueur active avec condensateur de déphasage de $5,5 \mu F$.

Ces constats nous ont fait choisir de traiter l'étude en alimentation diphasée équilibrée et en courants sinusoïdaux lorsque le point de fonctionnement couple-vitesse se situe dans la zone linéaire de la caractéristique couple-vitesse. Les optimisations sont conduites par la suite sous l'hypothèse de régime diphasé parfait décrite à la Figure 4.8.

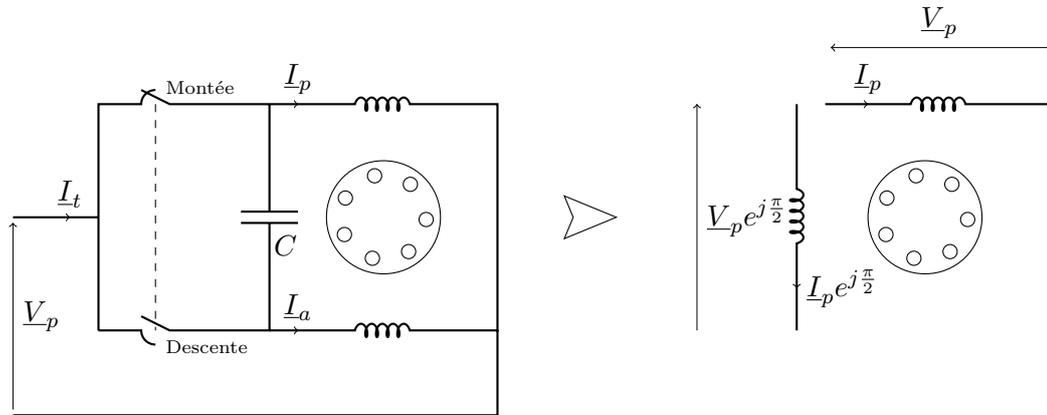


Figure 4.8 – Simplification du schéma d'alimentation diphasé de la machine monophasée.

Enfin pour justifier l'hypothèse d'alimentation équilibrée, nous présentons à la Figure 4.9 la comparaison de la courbe de couple de deux machines de longueurs actives 55 et 70 mm (avec respectivement 400 et 350 spires) issue d'expérimentation d'une part et calculée à partir d'une alimentation à courants équilibrés dans le modèle par éléments finis d'autre part. Le modèle éléments finis présente la même tension d'alimentation que la machine expérimentale (230 V).

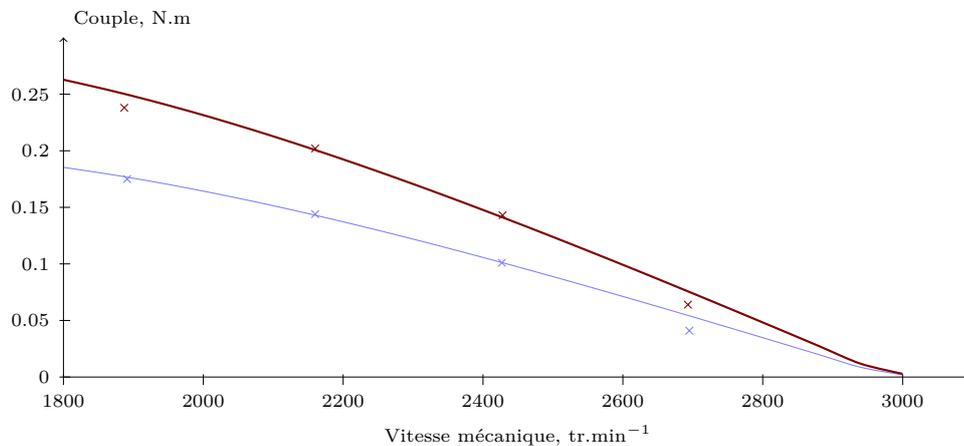


Figure 4.9 – Comparaison des relevés expérimentaux (points) et des calculs par éléments finis de couple à la tension d'alimentation de 230 V pour une machine de 55 mm de longueur active (clair) et 70 mm de longueur active (sombre).

Le principe du passage d'une alimentation en courant à une alimentation en tension est expliqué à la section §1.5.4, page 119. Le traitement pratique des résultats d'optimisation est proposé quant à lui à la section §2.4.1, page 125. Notons que la comparaison entre les courbes de couple présentées à la Figure 4.9 s'arrête vers les 2000 tours par minute car

les courbes obtenues par éléments finis proviennent de l'extraction des matrices de calculs systématiques dont nous avons limité l'excursion en fréquence rotorique à 20 Hz pour rester dans la plage de vitesse correspondant à des glissements déjà élevés, mais possibles et où l'hypothèse de courant équilibrés reste acceptable.

1.5.4 Calculs électriques

Calcul des pertes de fonctionnement. Le calcul des pertes de fonctionnement est effectué par éléments finis. Les pertes Joule statorique et rotorique sont ajustées par coefficients en post-traitement afin de prendre en compte les effets 3D qui ne sont pas calculés par le modèle éléments finis 2D. Ces coefficients sont estimés en comparant les pertes Joules calculées par élément finis et les pertes Joule expérimentales sur toutes les longueurs actives pour lesquelles nous avons des résultats expérimentaux. Nous en déduisons une expression des coefficients en fonction de la longueur active du moteur considéré.

Le calcul des pertes fer requiert de son côté un calcul spécifique. En effet, comme expliqué précédemment, le modèle de machine éléments finis n'est pas alimenté par la pulsation statorique de la machine expérimentale. Ainsi il n'est pas possible d'utiliser le calcul des pertes fer proposé par le logiciel car celles-ci ne sont pas calculées à la bonne pulsation. Nous utilisons donc la formulation empirique de Steinmetz en régime sinusoïdal [Liw67] qui nous donne une formulation des pertes fer volumiques en fonction du maximum d'induction et de la fréquence d'alimentation, le calcul du maximum d'induction étant indépendant de la fréquence d'alimentation. Nous appliquons en post-traitement ce calcul à la fréquence d'alimentation statorique des mesures : $f_s = f_r + p\Omega$ en notant Ω la vitesse mécanique de rotation du rotor.

$$P_f = \underbrace{(4k_H f_s + 2k_{cf} (\pi f_s)^2)}_{\text{post-traitement}} \underbrace{\iiint \hat{B}^2 d\vartheta}_{\text{éléments finis}} \quad (4.2)$$

Calcul de tension. Par post-traitement, nous ajoutons au modèle éléments finis 2D la prise en compte des effets 3D (têtes de bobines, anneaux de court-circuit, frein, etc.) afin d'être en mesure d'estimer la tension aux bornes d'une phase de la machine depuis la densité de courant définie pour le calcul par éléments finis. Les simulations par éléments finis sont effectuées, en non linéaire, sur une machine équivalente par spire alimentée en densité de courant à glissement unitaire. Cette prise en compte est mise en place par comparaison de caractéristiques de machines réelles obtenues lors d'essais expérimentaux et de leur simulation dans la configuration qui est retenue pour les optimisations. La prise en compte des effets 3D se fait donc ici par l'ajout d'impédances dont la valeur est calculée ci-dessous, ramenée à une spire.

Plaçons nous sur un cas de machine réelle donné, alimenté à la tension V_p , de nombre de spires N_{sp} , de pulsation statorique ω_s et rotorique ω_r . Le courant absorbé par sa phase principale est noté I_p . Dans un premier temps nous ramenons les grandeurs par spires du calcul éléments finis aux grandeurs classiques définies pour la machine réelle. Nous notons dès lors V_p' la tension aux bornes de la phase principale calculée par éléments finis, alimentée par des ampères tours ($N_{sp}i_p$) correspondant au courant I_p .

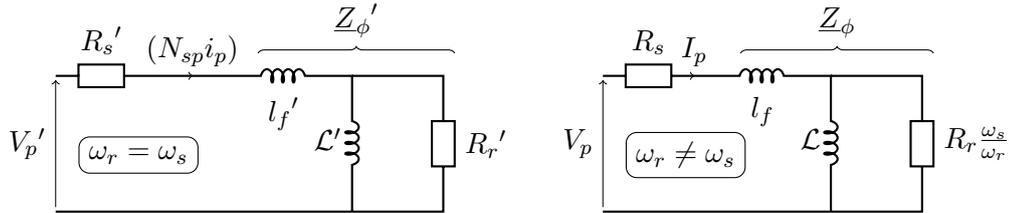


Figure 4.10 – Schéma électrique équivalent de la machine simulée par éléments finis (gauche) et de la phase principale de la machine réelle (droite).

Les schémas électriques de la phase principale présentés à la Figure 4.10 nous permettent d'identifier les différences entre moteur réel et moteur modélisé. Nous notons R_s la résistance du bobinage statorique, R_r la résistance rotorique ramenée au stator, l_f l'inductance équivalente de fuites, \mathcal{L} l'inductance magnétisante saturée. Leur pendant dans la modélisation par éléments finis est noté R_s' , R_r' , l_f' et \mathcal{L}' .

En considérant le flux embrassé par une phase ϕ_p (et ϕ_p' dans la modélisation par éléments finis) la tension aux bornes d'une phase s'écrit :

$$\underline{V}_p' = R_s' (N_{sp}i_p) + \underbrace{j\omega_s \phi_p'}_{\underline{Z}_{\phi}' (N_{sp}i_p)} \quad \underline{V}_p = R_s I_p + \underbrace{j\omega_s \phi_p}_{\underline{Z}_{\phi} I_p} \quad (4.3)$$

Le calcul par éléments finis nous donne R_s' et la connaissance des pertes Joule statoriques expérimentales donne R_s puis nous obtenons la résistance des têtes de bobines $R_s - R_s' = R_{tb}$.

Le rapport du flux embrassé par la phase principale et du courant absorbé nous donne une impédance complexe. Soulignons que le passage par le calcul de ces impédances est nécessaire du fait que le calcul par éléments finis se fait à rotor bloqué, donc à $\omega_s = \omega_r$, ce qui n'est pas le cas de la machine réelle. La différence de l'impédance calculée depuis les relevés expérimentaux et de celle obtenue par la modélisation éléments finis nous donne le reste des effets 3D de la machine non calculés par le modèle éléments finis (anneaux de court-circuit, frein, etc.) : $\underline{Z}_{\phi} - \underline{Z}_{\phi}' = \underline{Z}_{\phi_s}$. Nous proposons à la Figure 4.11 la valeur de ces éléments calculés pour différentes longueurs actives de machines pour lesquelles nous avons des relevés expérimentaux.

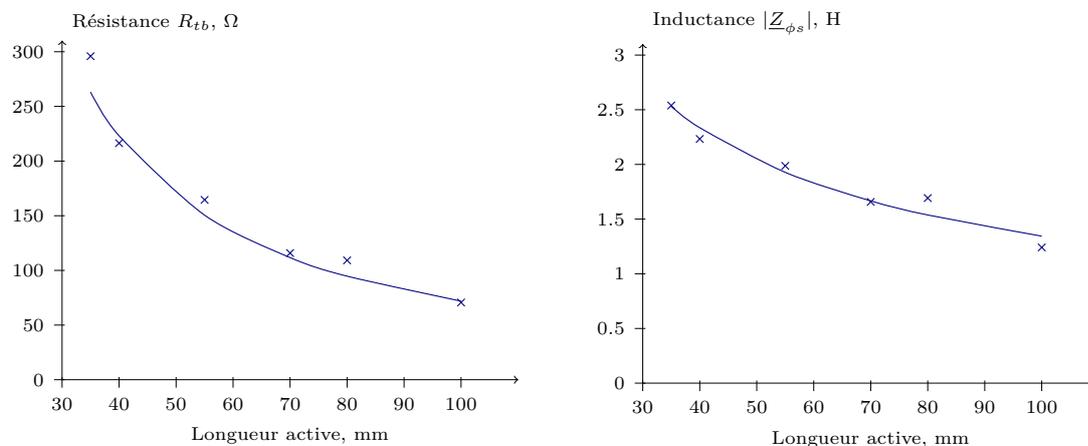


Figure 4.11 – Résistance et inductance supplémentaire à ajouter au modèle éléments finis pour prendre en compte les effets 3D en fonction de la longueur active des moteurs expérimentaux et courbes de tendances utilisées dans les optimisations.

Nous pouvons désormais calculer la tension aux bornes de la phase principale V_p' à partir de la densité de courant du calcul par éléments finis. Nous supposons enfin que ces deux éléments ne dépendent pas de la variation de vitesse de la machine lors des simulations. Notons enfin que l'importance des effets 3D diminue logiquement avec l'augmentation de la longueur active. Connaissant le nombre de spires associé à chaque longueur active de moteur, nous ramenons ensuite ces deux éléments d'impédance à des valeurs pour une spire que nous utilisons dans la suite de nos calculs.

1.6 Modélisation thermique

Le moteur est sollicité sur des temps très courts (moins de 30 secondes), il en résulte un échauffement pratiquement adiabatique. En cas d'utilisation excessive, la température du bobinage est limitée à 155 °C par l'usage d'une capsule thermique à pouvoir de coupure, insérée dans les enroulements.

Sur des durées d'une trentaine de seconde, le fonctionnement purement adiabatique, vérifié expérimentalement sur des essais d'échauffement de moteurs réels, permet d'exprimer l'élévation de température en fonction de la puissance dissipée dans le bobinage et sa capacité thermique. Nous estimons l'élévation de température dans le bobinage lors d'un cycle de fonctionnement en intégrant les pertes Joule statoriques.

$$\Delta\theta_{b,0} = \int \frac{P_{Js}}{C_b} dt \quad (4.4)$$

Nous calculons uniquement l'échauffement des bobinages lors des sollicitations de l'actionneur sur une montée du volet roulant, la descente se faisant pour un temps et une puissance plus faibles, elle est moins contraignante thermiquement, comme constaté sur le cycle de fonctionnement présenté à la Figure 4.13, page 124. Enfin, nous supposons qu'entre chaque utilisation le moteur est laissé au repos suffisamment longtemps pour revenir à la température ambiante. La contrainte thermique est la seule contrainte de ce problème d'optimisation.

2. Mise en place des calculs

2.1 Analyse sur cycle de vie

Nous ne disposons pas des données de coûts environnementaux concernant les processus de production. Par exemple, la phase d'assemblage du moteur est effectuée par construction semi-automatique nécessitant la préparation des bobines par machine, insertion et guidage dans les encoches par aiguille guidée manuellement. Il s'agit en outre de moteurs de grande série (42500 moteurs par jour, tous sites de production confondus). Enfin, le scénario de fin de vie de ces moteurs domestique n'est pas connu, car il n'implique pas de recyclage (mise à disposition aux encombrants dans le meilleur des cas). Les impacts environnementaux de cette phase du cycle de vie ne sont donc pas pris en considération.

Ainsi, seuls les impacts environnementaux concernant la production des matières premières, la production de l'énergie électrique et le transport sont pris en compte dans cette analyse sur cycle de vie. La première raison est le manque de données chiffrées concernant l'assemblage spécifiques des moteurs étudiés. Une seule donnée est remontée depuis un des fournisseurs de tôles de SOMFY, présentant une production annuelle sur l'usine de 200000 t de paquets de tôles (par emboutissage et injection d'aluminium) pour un coût de production final (estimé depuis la consommation d'électricité annuelle) de 0,26 Wh par kilogramme de tôle. La deuxième raison est mise en lumière par cette donnée : il s'agit d'un coût d'énergie globale sur cycle de vie totalement négligeable devant les coûts d'extraction des matières premières (par exemple le coût énergétique d'extraction d'un kilogramme d'acier est de 6,3 kWh, le cuivre et l'acier ayant un coût énergétique de production encore supérieur). Nous supposons donc que cette valeur d'énergie consommée pour les autres processus de production est très probablement négligeable devant celle nécessaire à la production des matières premières (il en est de même pour les rejets de gaz à effet de serre).

Le calcul de l'énergie globale sur cycle de vie de la machine est identique à celui conduit au Chapitre 3, aboutissant à l'équation (3.8), page 76. Un extrait comportant les

chiffres utilisés dans les simulations sur le modèle de la machine asynchrone monophasée est présenté au Chapitre 3, Table 3.1 page 76.

En l'absence de données spécifiques, nous proposons une première estimation de la consommation globale d'énergie sur cycle de vie et du potentiel de réchauffement climatique du condensateur de déphasage. En effet, la masse du condensateurs de déphasage utilisé dans les différentes configurations de moteurs varie entre 30 et 50 grammes, d'après la documentation constructeur. En supposant que le condensateur est entièrement constitué de polypropylène (la masse des contacts d'aluminium est négligeable devant celle des conducteurs rotoriques) nous obtenons une consommation globale sur cycle de vie comprise entre 2,1 et 3,5 kWh et un potentiel de réchauffement climatique compris entre 57.10^{-4} et 95.10^{-3} kg éq. CO₂ (énergie de production d'un kilogramme de polypropylène : 70 kWh et potentiel de réchauffement climatique : 1,9 kg éq. CO₂). Comme nous allons le constater sur les résultats d'optimisation, ces valeurs d'impacts environnementaux sont négligeables devant les valeurs d'objectifs atteints par les solutions Pareto-optimales.

2.2 Vieillessement

D'après l'expérience du constructeur, les premières causes de vieillissement ne sont pas les chocs thermiques subis par les bobinages, mais plutôt une fatigue mécanique du frein ou une fatigue en cyclage du condensateur de déphasage. Nous faisons donc l'hypothèse que ce moteur ne vieillit pas ni thermiquement ni mécaniquement.

Nous ne considérons pas dans cette étude le vieillissement en cyclage du condensateur de déphasage. Le vieillissement dû au niveau de tension à ses bornes est, quand à lui, négligeable, comme nous pouvons le constater à la Figure 4.12, tirée de la documentation constructeur des condensateurs utilisés dans la construction des actionneurs tubulaires considérés. Rappelons que, dans ce schéma, l'amplitude de la tension aux bornes du condensateur peut tout à fait dépasser celle de la tension d'alimentation (elle dépend de la vitesse de rotation de la machine).

Nous considérons ainsi une durée de vie du moteur de sept ans, indépendante de son dimensionnement électrique dans un contexte d'utilisation quotidienne, ce qui conduit à un fonctionnement cumulé d'environ 35 heures. En effet, les moteurs commercialisés sont qualifiés à 10000 cycles, ce qui nous donne une durée d'utilisation moyenne de près de trente ans en fonctionnement à un cycle par jour. Sept ans représentent la durée classique de garantie constructeur concernant ses moteurs. Leur utilisation dans cette période ne nécessite donc pas de maintenances, les moteurs ne présentant statistiquement pas de défaillances. Bien que la durée de trente ans soit plus compatible avec celle des durées d'équipements du bâtiment, nous gardons une durée d'utilisation de sept ans afin de mieux mettre en valeur la différence entre les optimisations sur cycle de vie et sur la seule phase de fonctionnement.

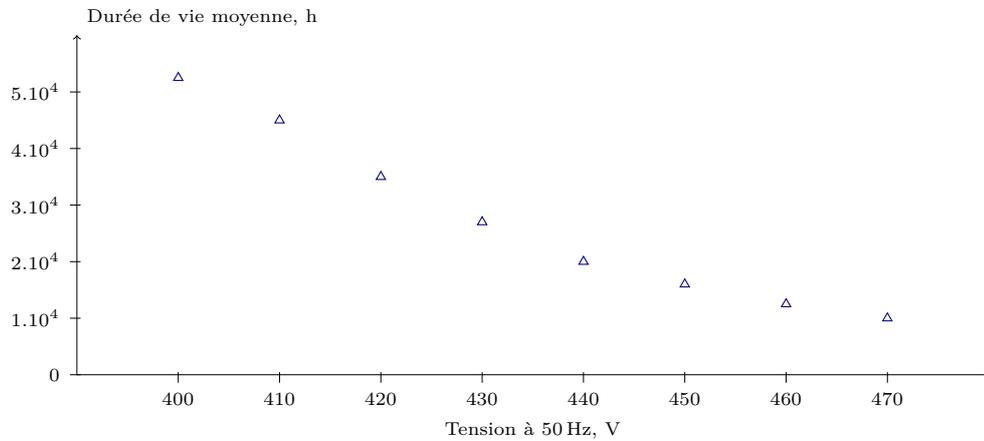


Figure 4.12 – Durée de vie attendue par le condensateur de déphasage, à 50 Hz, en fonction de la tension à ses bornes [ARC02].

2.3 Cycle de fonctionnement

2.3.1 Charge vue par le moteur

Le moteur étudié est prévu pour une motorisation de volet roulant. Le couple exercé par le moteur n'est pas constant, celui-ci variant à la fois en fonction de la masse en suspension et du diamètre d'enroulement. En effet, avec le degré d'ouverture du volet la première diminue alors que la seconde augmente. Ce couple passe donc par un maximum, comme présenté à la Figure 4.13.

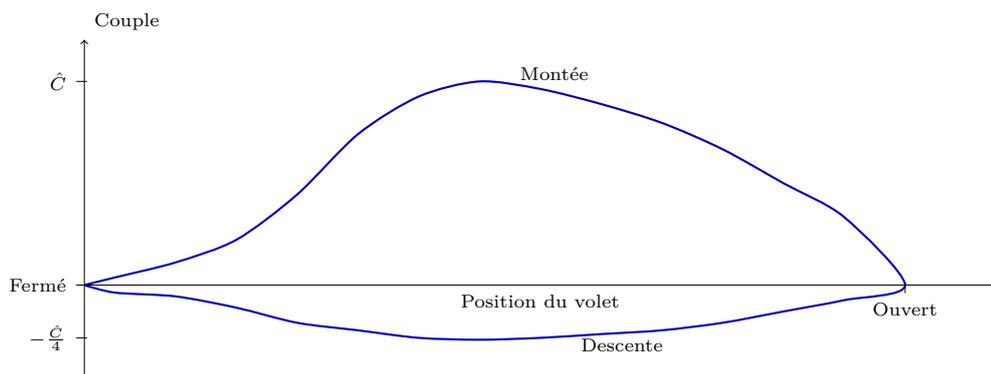


Figure 4.13 – Couple vu par le moteur [Gre95].

Le couple est nul en position fermée (le tablier repose sur le sol) et en position d'ouverture complète (le volet est enroulé). Du fait du caractère partiellement irréversible du

réducteur (son rendement est moins bon en inverse qu'en direct) le couple maximal vu par le moteur est environ quatre fois plus faible en charge menante qu'en charge menée [Gre95]. La vitesse est déduite du profil de couple présenté à la Figure 4.13 et de la caractéristique couple vitesse de la machine. La valeur négative correspond à un couple moteur mais avec un sens de rotation également négatif.

Plutôt que de numériser le profil de couple, nous le modélisons par deux arches de sinusoides, permettant une définition complète du cycle de fonctionnement avec la connaissance d'un seul point. Notons qu'il s'agit là d'une valeur de couple moyennée. En effet, la constitution des volets en lames conduit à l'apparition de petites ondulations de couple non représentées à la Figure 4.13. Le cycle de fonctionnement passe ainsi par une valeur maximale \hat{C} pour la montée du rideau et minimale $-\hat{C}/4$ pour la descente. L'évolution temporelle du couple est présentée à la Figure 4.14. L'évolution temporelle de la vitesse et du couple est nécessaire à l'intégration des pertes de fonctionnements pour le calcul des objectifs et de l'échauffement du bobinage pour le calcul de la contrainte. En ce qui concerne la phase utile, nous considérons que le moteur est sollicité chaque jour pour une montée et une descente du volet roulant durant respectivement 25 et 20 secondes et un couple \hat{C} de 0,1 N.m . Ces valeurs sont choisies à titre indicatif à partir d'une application réelle (volet roulant dont le tablier mesure 2 m de hauteur sur 2,5 m de largeur).

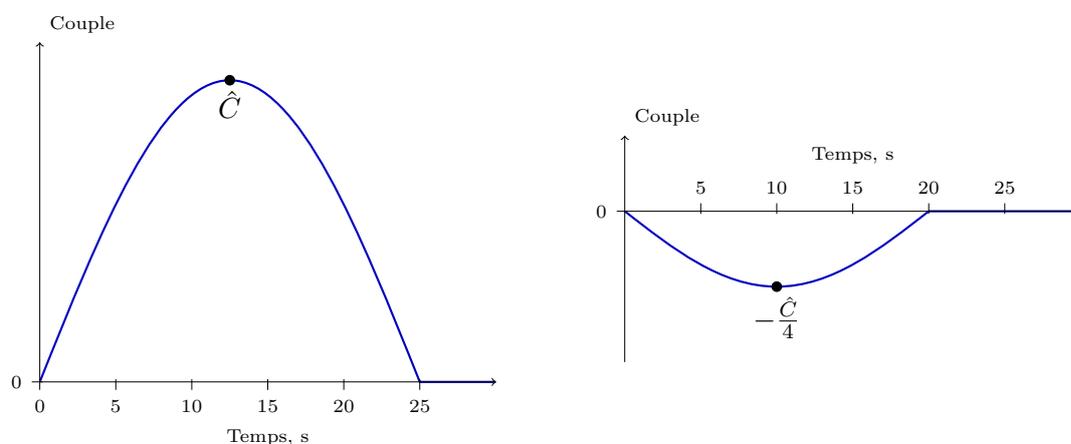


Figure 4.14 – Profil de couple idéalisé sur une montée puis une descente du rideau.

2.4 Optimisations

2.4.1 Approche de calcul

Extraction des résultats de simulation. L'utilisation du logiciel FEMM, en non linéaire et magnétodynamique, dans une boucle d'optimisation par algorithme évolutionnaire s'avère

trop pénalisante en temps de calcul (la simulation d'une machine demande jusqu'à cinq minutes de temps de calcul pour des optimisations menées sur une centaine d'individus et un millier de générations). Nous optons finalement pour une approche de calculs systématiques effectués une fois pour toute en alimentation en courant, simplifiant grandement l'exploitation des résultats. Selon les critères précisés à la section §1.5.3 page 115, nous lançons les calculs systématiques dans l'hypothèse d'un régime diphasé équilibré. Ainsi, nous assemblons dans un premier temps des matrices de couples et de pertes pour un ensemble de points de fonctionnement définis par une fourchette de fréquences et de courants donnés sur une machine à une spire par phase et un mètre de longueur active. Toutes les grandeurs calculées par éléments finis 2D sont ainsi exprimées en unité par mètre et par spire sachant que les effets des têtes de bobines sont comptabilisés à posteriori. La fréquence rotorique varie de 0 à 20 Hz avec un pas de 1 Hz et le courant de 10 à 1000 A.tours avec un pas de 50 A.tours.

L'introduction des paramètres d'optimisation (L_a et N_{sp}) se fait une fois les simulations terminées, c'est-à-dire qu'il est possible de tester une grande étendue de paramètres sans avoir à relancer de simulation. L'étape d'extraction des données s'effectue sous forme de calcul matriciel (instantané à l'échelle de temps des simulations) diminuant d'autant le temps d'optimisation qui aurait été significatif pour des simulations de chaque longueur active et chaque nombre de spires. Rappelons que ceci n'aurait pas été applicable dans le cas d'une simulation directe avec alimentation en tension (se référer à la section §1.5.3, page 115).

En appliquant les calculs présentés à la section §1.5.4 page 119, nous obtenons des matrices contenant les courbes de couple et de pertes en fonction de la tension aux bornes d'une phase recalculée pour chaque pas de fréquence rotorique, chaque longueur active et chaque nombre de spires. En effet, le calcul de la tension introduit automatiquement la longueur active de la machine et le nombre de spires. Ainsi, pour chaque couple de ces paramètres (les seuls paramètres réels d'optimisation) nous récupérons la courbe de couple en fonction de la fréquence rotorique à partir des courbes de couple en fonction de la tension aux bornes de la phase principale de la machine, selon le principe présenté à la Figure 4.15. Cette courbe finale que nous proposons sous la forme de couple en fonction de la vitesse mécanique est ainsi valable pour une tension d'alimentation, une longueur active et un nombre de spires donné. Dans le cas de la Figure 4.15, la tension est de 230 V, la longueur active de 70 mm et le nombre de spires de 600. Notons enfin que cette étape nécessite d'interpoler les différentes grandeurs entre les pas réels de simulation par éléments finis. Rappelons aussi que nous présentons un exemple de courbes de couple issues de ce pas d'extraction de données à la Figure 4.9 page 118 pour justifier l'hypothèse d'alimentation en courants équilibrés.

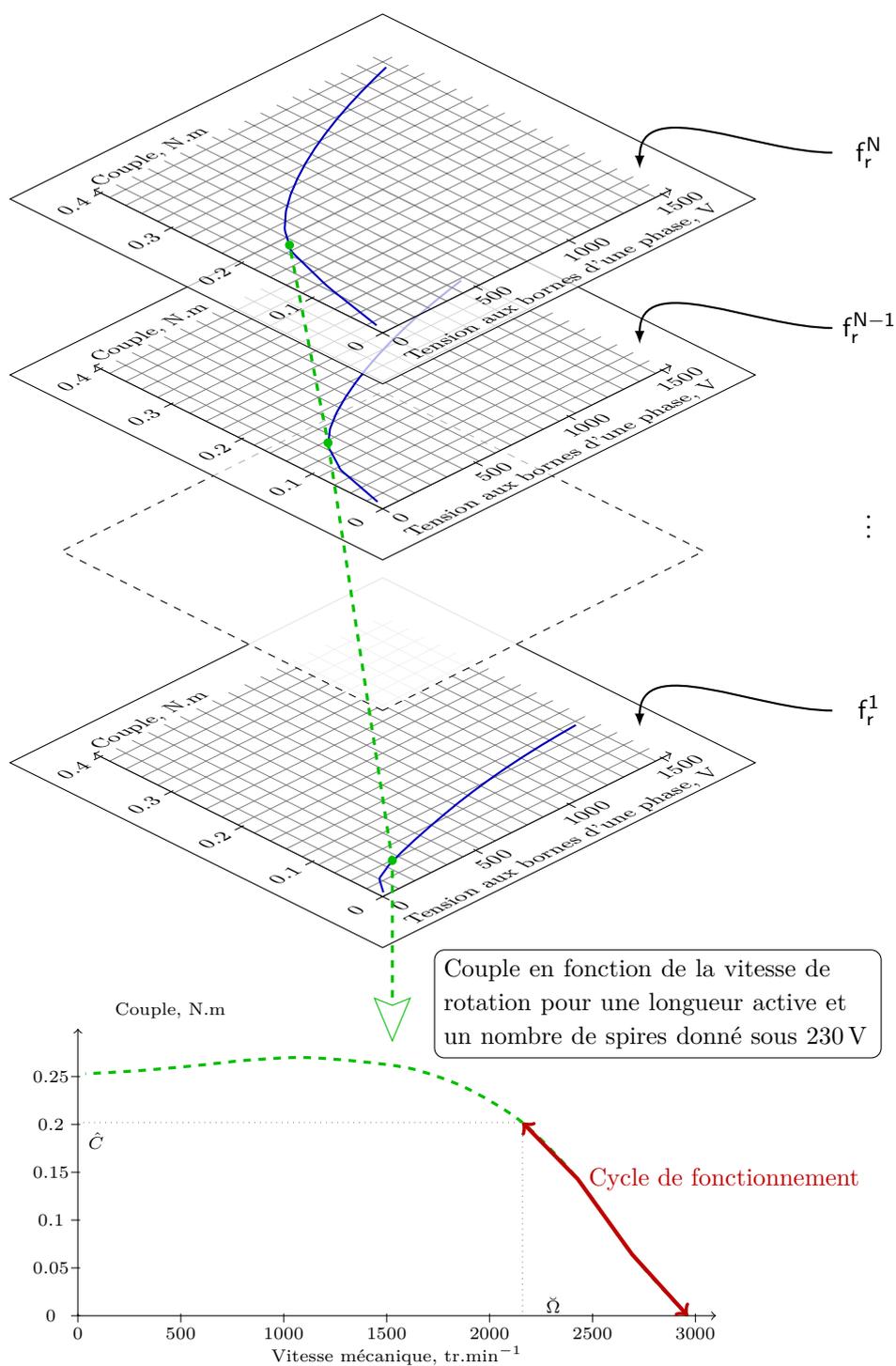


Figure 4.15 – Extraction du cycle de fonctionnement pour chaque longueur active et nombre de spires. f_r^i représente une valeur de fréquence rotorique utilisée dans les simulations.

Calculs d'optimisation. Suite à ces calculs d'extraction nous calculons ce qui constitue les objectifs et contraintes de l'optimisation. Pour chaque longueur active et chaque nombre de spires, nous vérifions que le moteur peut fournir le service utile sous contrainte de température maximale, défini par le profil de couple présenté à la Figure 4.14. Dans ce cas, nous intégrons les pertes de fonctionnement sur le cycle de fonctionnement présenté en bas de la Figure 4.15.

L'affichage dans le plan des objectifs de l'ensemble des solutions nous permet finalement de ne garder que les solutions optimales. Notons que cette étape de sélection finale est habituellement réalisée par l'algorithme d'optimisation. Le choix d'un calcul systématique nous oblige à l'effectuer à part.

Enfin une contrepartie de l'optimisation systématique est qu'elle empêche de faire varier les données physiques du problème sur un cycle de fonctionnement donné, chaque point de simulation étant indépendant du précédent et du suivant. Il aurait été possible de lancer aussi les calculs systématiques pour différentes valeurs de résistivités. Afin de limiter le nombre de simulation, estimons les grandeurs physiques à la valeur de température de la contrainte thermique.

3. Optimisation des dimensions du moteur

3.1 Configuration initiale

Les résultats d'optimisation sont obtenus en considérant un profil de couple de forme sinusoïdale comme présenté à la Figure 4.14 avec pour valeur maximale de montée du rideau \hat{C} de 0,1 N.m, un temps de montée de 25 s et un temps de descente de 20 s, le moteur étant utilisé sept ans avec un cycle par jour sous une tension de 230 V. Ces données sont tirées d'une application réelle de volet roulant. Nous présentons à la Figure 4.16 la répartition des solutions dans l'espace des objectifs après récupération des valeurs minimales et prise en compte de la contrainte thermique. Rappelons que la masse des parties actives est directement associée à la longueur active comme présenté à la Figure 4.3, page 111.

En prenant comme objectif non plus l'énergie sur cycle de vie mais le potentiel de réchauffement climatique, nous obtenons des courbes d'allures très similaires, le calcul de cet impact environnemental étant identique à celui de l'énergie globale sur cycle de vie. Nous présentons ainsi nos résultats en fonction de la seule énergie globale sur cycle de vie par la suite, sauf dans la section concernant l'analyse de sensibilité des résultats à la section §3.4.1, page 136. De plus, les courbes présentées correspondent aux solutions Pareto-optimales, les solutions dominées présentées à la Figure 4.16 étant éliminées.

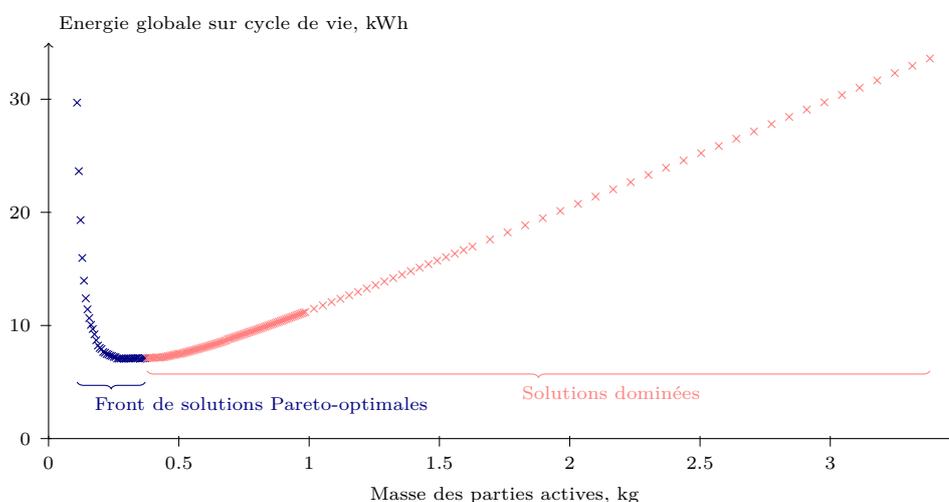


Figure 4.16 – Front de solutions après application de la contrainte thermique puis sélection des solutions Pareto-optimales.

3.1.1 Paramètres

Nous proposons ensuite à la Figure 4.17 l'évolution des deux paramètres d'optimisation dans le plan des objectifs. La longueur active L_a est présentée en fonction de l'énergie globale sur cycle de vie et le nombre de spires N_{sp} en fonction des objectifs de masse et d'énergie.

Nous retrouvons le minimum d'énergie sur cycle de vie sur la longueur active et le nombre de spires. Ainsi une solution minimisant l'énergie sur cycle de vie, alimentée sous 230 V avec la configuration géométrique présentée précédemment présente une longueur active de 45 mm et 800 spires par phase. Cette géométrie de moteur est proche d'un moteur commercialisé par SOMFY pour ce niveau de couple, de 50 mm de longueur active et 800 spires par phases.

La distribution des longueurs actives en fonction de l'énergie sur cycle de vie rejoint la forme du front de Pareto, du fait de la relation entre longueur active et masse des parties actives. Le nombre de spires passe quand à lui par un maximum. En effet, les solutions dominées non représentées ici (grande masse) voient leur nombre de spires diminuer et leur énergie sur cycle de vie augmenter à nouveau, le service utile étant identique. Le maximum du nombre de spires ne correspond pas au minimum d'énergie globale sur cycle de vie.

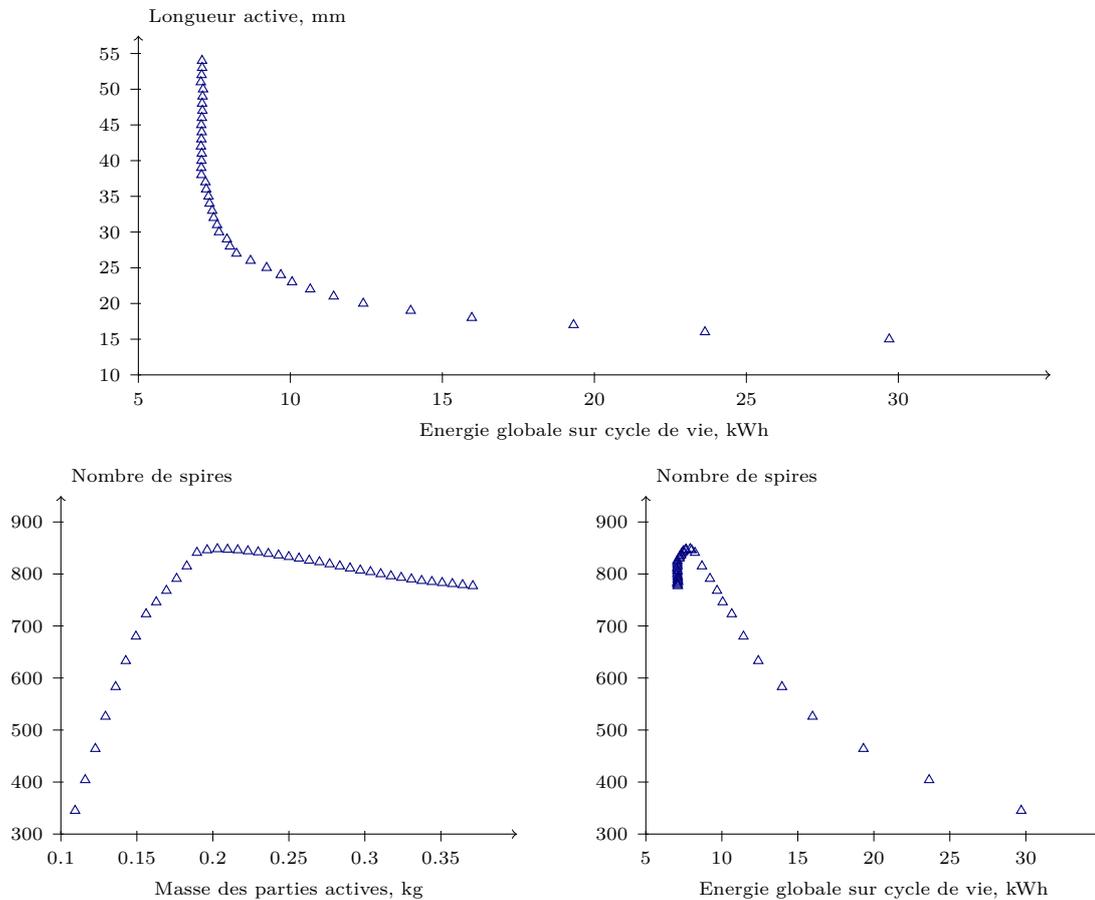


Figure 4.17 – Répartition des paramètres d'optimisation dans l'espace des objectifs.

3.1.2 Energies

Une comparaison des résultats obtenus sur critère d'énergie globale sur cycle de vie et critère d'énergie des seules pertes de fonctionnement est présentée à la Figure 4.18 (gauche).

Les solutions optimisant l'énergie globale sur cycle de vie atteignent un minimum limitant le front des solutions Pareto-optimales à une valeur optimale de masse active apparaissant à la Figure 4.16 entre le front des solutions Pareto-optimales et les solutions dominées (0,3kg sur cette figure). Ce n'est pas le cas de l'optimisation sur le critère des seules pertes de fonctionnement. Ceci provient de la différence de contribution entre l'énergie dissipée en fonctionnement et les coûts énergétiques de production et transport dans l'énergie globale sur cycle de vie.

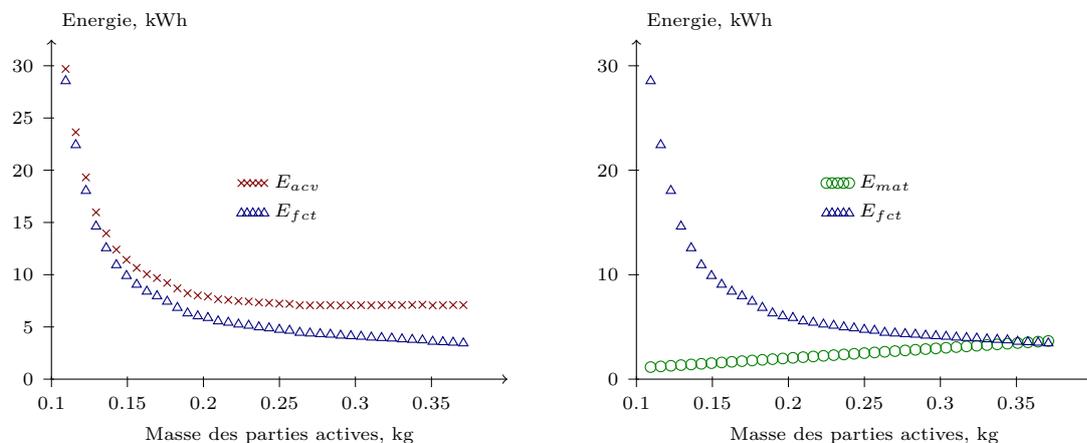


Figure 4.18 – Comparaison des fronts de solutions Pareto-optimales d'une optimisation de l'énergie sur cycle de vie et sur la seule phase de fonctionnement (gauche). Contributions à l'énergie globale sur cycle de vie en fonction de la masse des parties actives (droite).

La part de l'énergie dissipée en fonctionnement relativement à celle utilisée pour les phases de production et transport est mise en évidence à la Figure 4.18 (droite). Nous constatons effectivement que la part des pertes de fonctionnement décroît avec l'augmentation de la masse alors que les coûts de production et de transport lui sont, quant à eux, proportionnels.

3.1.3 Contrainte

Enfin nous proposons à la Figure 4.19 l'évolution de la température, seule contrainte d'optimisation, en fonction de la masse des parties active et de l'énergie.

Notons qu'il existe, dans le cas du moteur réellement commercialisé, une norme imposant un temps de fonctionnement (de montées et descentes successives) de quatre minutes avant coupure thermique, le moteur restant toujours sensiblement en régime adiabatique. La longueur active minimale obtenue lors de ces simulations ne permet pas de satisfaire à cette norme. En effet, elle apparaît limitée par l'échauffement sur un seul cycle de montée.

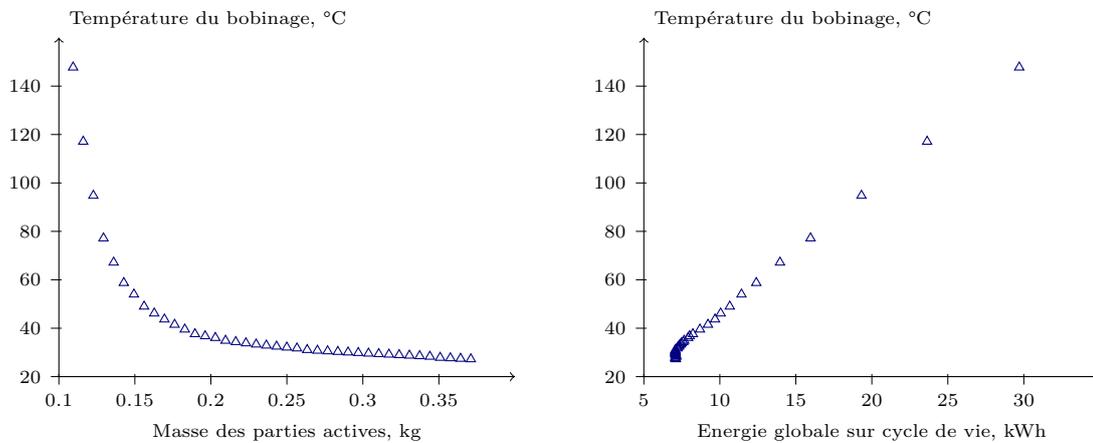


Figure 4.19 – *Température atteinte par le bobinage des solutions retenues en fonction des objectifs de masse des parties actives (gauche) et énergie globale sur cycle de vie (droite).*

3.2 Sensibilité de la machine à la tension d'alimentation

Nous proposons à titre indicatif à la Figure 4.20 les fronts de Pareto obtenus pour une alimentation du moteur de plus ou moins 10 % autour de la tension d'alimentation de 230 V. Nous constatons que l'impact de cette variation de tension est indiscernable sur la présentation des solutions Pareto-optimales.

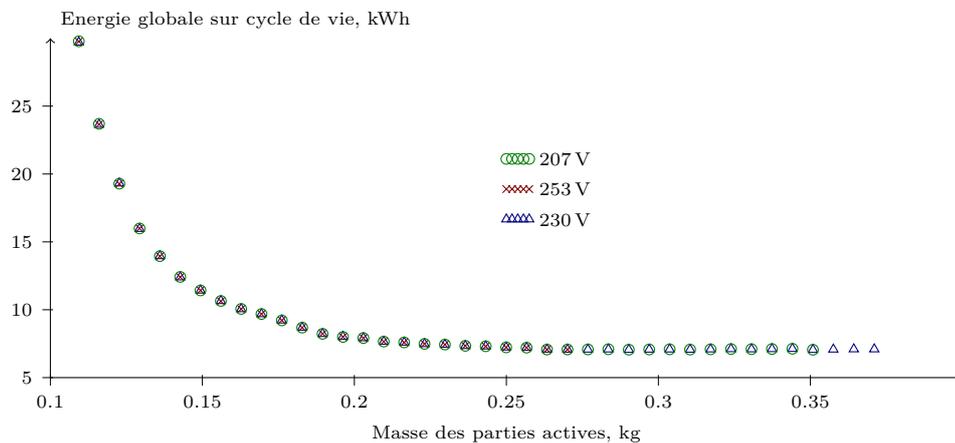


Figure 4.20 – *Front de solutions pour une alimentation de 230, 207 et 253 V.*

3.3 Sensibilité à l'usage de l'actionneur

Deux types d'usages sont considérés pour les actionneurs tubulaires contenant les moteurs modélisés. Le premier, représentant un fonctionnement manuel, est d'un cycle aller et retour par jour, dont les résultats d'optimisation ont été présentés au paragraphe précédent. Le second, représentant un fonctionnement automatique, est de cinq cycles par jour. Le second cycle est destiné par exemple aux bâtiments publics dont la couverture des interfaces avec l'extérieur selon les variations météorologiques peut présenter un gain énergétique significatif, au niveau du chauffage ou de la climatisation, de l'aération, etc. Ces techniques automatisées semblent intéressantes mais ont une contrepartie non négligeable, à savoir l'automatisation et le contrôle de l'ensemble de ces dispositifs d'interface ainsi qu'un nombre accru de cycles moyen par jour sur la durée totale d'utilisation.

Nous proposons à la Figure 4.21 une comparaison des résultats d'optimisation précédents avec ceux d'une seconde optimisation basée sur un cycle de fonctionnement défini par cinq aller-retour du volet roulant par jour. Un premier constat est que le minimum d'énergie sur cycle de vie est déplacé par l'ajout de cycles de fonctionnements, proposant comme machine optimale une machine de longueur active plus importante. Une seconde remarque est que ces courbes ne se rejoignent pas au niveau des solutions de masse des parties actives optimales. En effet, dans ce cas les pertes de fonctionnement ne sont pas encore négligeables devant les autres coûts du cycle de vie de la machine, qui sont identiques pour les deux optimisations. Dans le cas extrême inverse la différence entre les deux courbes est directement la différence entre les pertes de fonctionnement, dans notre cas un rapport cinq.

Le cycle de fonctionnement conditionne l'énergie des pertes dissipées en fonctionnement donc la disposition des solutions dans le plan des objectifs. Il a cependant aussi une action sur l'énergie utile effectivement convertie, nécessitant d'affiner la comparaison des deux optimisations. Un moyen de comparaison classique des moteurs, lorsque leur cycle de fonctionnement varie, est naturellement leur rendement. Nous rappelons la définition du rendement sur cycle de fonctionnement à l'équation (4.5a) et définissons un second rendement que nous appelons rendement sur cycle de vie. Notons que sa définition est donnée dans le cas de l'énergie globale sur cycle de vie car le service utile du composant électrotechnique est de fournir une énergie utile, mais nous pouvons tout à fait définir un rendement similaire pour le potentiel de réchauffement climatique ou tout autre impact environnemental. Il s'agit dans tous les cas de la prise en compte du cycle de vie dans le calcul du rendement et non plus de la seule phase utile. En notant P_u la puissance utile, η_f le rendement sur cycle de fonctionnement (envisageant déjà l'ensemble des points de fonctionnement sur un cycle) η_{cv} le rendement sur cycle de vie, E_{acv} l'énergie globale sur cycle de vie et P_{fet} les pertes de fonctionnement, nous avons :

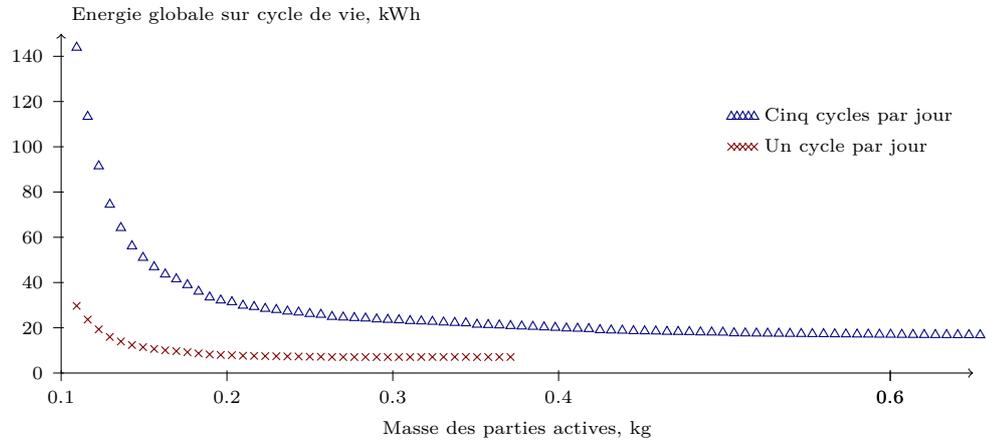


Figure 4.21 – Comparaison des fronts de solutions avec un cycle de fonctionnement par jour et cinq cycles de fonctionnement par jour sur sept ans.

$$\eta_f = \frac{\int_{fct} P_u dt}{\int_{fct} P_u dt + \int_{fct} P_{fct} dt} \quad \eta_{cv} = \frac{\int_{fct} P_u dt}{\int_{fct} P_u dt + E_{acv}} \quad (4.5a)$$

avec

$$E_{acv} = N_c \int_{fct} P_{fct} dt + E_{mat} \quad (4.5b)$$

L'usage se résume au final à un nombre de cycles donné, noté N_c , de montée et descente du volet roulant sur sa durée de vie de référence. Dès lors, une action sur le nombre de cycles par jour et une action sur la durée totale d'utilisation du moteur ont le même impact sur le rendement sur cycle de vie. L'impact du nombre de cycles sur la thermique du moteur n'est pas pris en compte dans notre cas, où nous supposons que le moteur a le temps de revenir à la température ambiante entre chaque utilisation. Ainsi le rendement sur cycle de vie peut également s'écrire, dans cette configuration de fonctionnement sous forme de cycles répétés, comme suit :

$$\eta_{cv} = \frac{N_c \int_{cycle} P_u dt}{N_c \int_{cycle} (P_u + P_{fct}) dt + E_{mat}} \quad (4.6)$$

Nous proposons à la Figure 4.22 le rendement sur cycle de vie de moteurs soumis à un ou cinq cycles de montée et descente par jour sur la même durée totale de fonctionnement

ainsi que le rendement sur cycle de fonctionnement. Les courbes sont obtenues en optimisant les deux critères E_{acv} et masse active. Le rendement sur cycle de fonctionnement est indépendant du nombre de cycles de montée et descente par jour, ce qui n'est pas le cas du rendement sur cycle de vie. La position du maximum de rendement sur cycle de vie dépend de la proportion des pertes de fonctionnement dans l'énergie globale sur cycle de vie, c'est-à-dire, à service utile identique, directement du nombre de montées et descentes par jour. Plus ce nombre est important, plus le rendement sur cycle de vie « suit » le rendement sur cycle de fonctionnement sur une large plage de solutions avant de décrocher pour passer par un maximum et diminuer une fois passée la solution optimale.

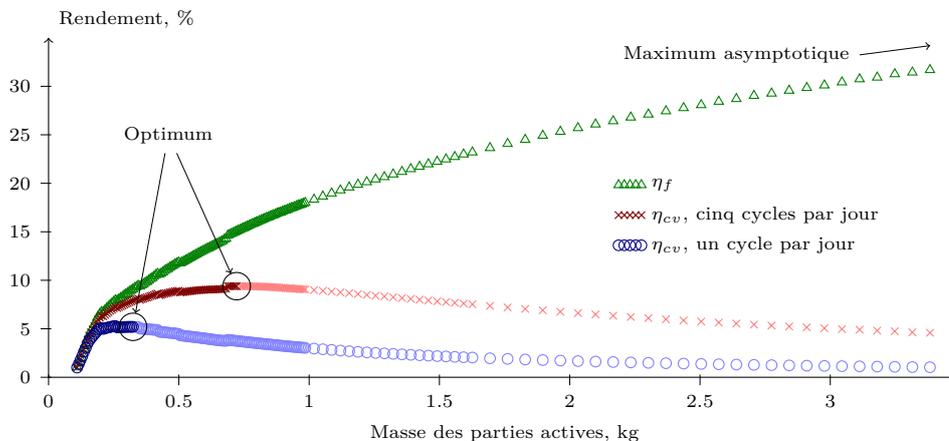


Figure 4.22 – Comparaison des rendements de solutions avec un cycle de fonctionnement par jour et cinq cycles de fonctionnement par jour sur sept ans ainsi que le rendement sur cycle de fonctionnement, identique dans les deux cas. Ajout des solutions dominées (en clair) présentées à la Figure 4.16 page 129 pour souligner l'optimum du rendement sur cycle de vie. Critère d'optimisation E_{acv} vs. Masse active.

La prise en compte de l'analyse sur cycle de vie fait apparaître un optimum de rendement sur cycle de vie dépendant du nombre de cycles d'utilisation. Ainsi au delà d'une masse active optimale (0,32 kg pour un aller-retour par jour et 0,72 kg pour cinq aller-retours par jour) le coût énergétique de la masse pénalise le moteur et fait chuter le rendement sur cycle de vie mais pas le rendement sur cycle de fonctionnement. Les résultats d'optimisation sont sensibles à la définition du cycle de fonctionnement en ce sens que l'ajout d'une montée et descente du volet roulant par jour suffit pour décaler le point de rendement sur cycle de vie maximum de 5 % à 9 % tout en le repoussant vers de plus grandes masses actives.

A solution de masse infinie, le rendement sur cycle de vie tend vers zéro d'après l'équation (4.5a). Les pertes de fonctionnement diminuant avec la masse des parties actives, le rendement sur cycle de fonctionnement tend quant à lui vers 100 %.

Nous remarquons que le rendement sur cycle de vie est meilleur lorsque le moteur est utilisé plus souvent. En effet, qu'il soit utilisé plusieurs fois par jour ou une seule fois, le moteur a le même coût environnemental de production, transport, etc. Le découplage entre la phase de fonctionnement et les autres phases du cycle de vie permet ainsi d'obtenir cet effet en faveur du plus grand nombre de cycles de fonctionnement par jour. Ceci est toutefois à modérer par le fait qu'un meilleur rendement sur cycle de vie ne signifie pas une consommation plus faible. Naturellement, plus le moteur est sollicité, plus sa consommation d'énergie globale sur cycle de vie est grande.

Notons enfin que cette définition de rendement sur cycle de vie est aussi intéressante d'un point de vue industriel et normatif. En effet, dans ce cas de figure le rendement sur un cycle (sur un seul point) de fonctionnement ne présente pas un bon critère de caractérisation des moteurs. Ainsi, une norme définie sur des « petits » moteurs sans prise en compte de leur utilisation spécifique peut aller à l'encontre d'une conception sur cycle de vie, pénalisant certaines catégories de moteurs pour leur mauvais rendement sur cycle de fonctionnement, alors qu'en réalité, au terme d'un écobilan, leur impact environnemental est plus faible que celui de moteurs équivalents à meilleur rendement sur cycle de fonctionnement.

3.4 Sensibilité aux paramètres environnementaux

Le cycle de vie du moteur se décomposant en deux phases découplées (la phase de fonctionnement d'un côté et le reste du cycle de vie de l'autre) nous menons naturellement une analyse de sensibilité sur des coûts élémentaires portant sur chacune de ces deux parties du cycle de vie du moteur. La première est la phase utile, dont la consommation d'énergie électrique non utile (pertes) est ramenée en énergie primaire par l'intermédiaire du mix énergétique. Le reste du cycle de vie est décrit par une somme de coûts environnementaux exprimés en fonction de la masse de produit considéré. Les deux études de sensibilité aux coûts environnementaux portent donc sur le mix énergétique et sur les coûts d'extraction des matières premières.

3.4.1 Potentiel de réchauffement climatique

Comme nous l'avons précisé précédemment, à prix énergétique donné, un bilan carbone est équivalent à un bilan de l'énergie globale sur cycle de vie du point de vue méthodologique. La position des minima d'énergie et de potentiel de réchauffement climatique dépendent de l'usage du moteur, ainsi que du choix des données d'analyse sur cycle de vie, notamment le mix énergétique. En effet, la solution optimale n'est à priori pas identique selon le critère environnemental considéré. Il s'agit alors de sélectionner le ou les impacts prépondérants, représentant le potentiel d'amélioration le plus important ou tout simple-

ment faisant l'objet de normes environnementales. De ce choix dépendent les solutions de dimensionnement.

Nous proposons ici les fronts de solutions selon le potentiel de réchauffement climatique dans deux cas intéressants. La production d'énergie est en France d'origine massivement nucléaire, limitant ainsi son impact environnemental selon le critère du potentiel de réchauffement climatique. Afin d'illustrer l'impact des hypothèses d'inventaire d'analyse sur cycle de vie sur les résultats d'optimisation, nous comparons à la Figure 4.23 les résultats d'optimisation suivant que le potentiel de réchauffement climatique est estimé avec un mix énergétique européen ou français.

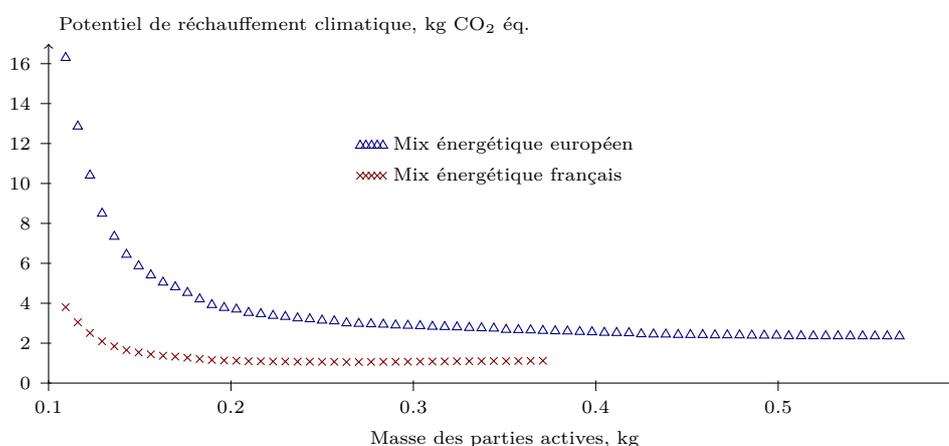


Figure 4.23 – Comparaison entre les fronts de solution dans l'espace des objectifs (masse des parties actives vs. potentiel de réchauffement climatique) pour le mix énergétique français et européen. Cycle de fonctionnement d'un aller-retour par jour répété sur sept ans.

La différence entre le nombre de kilogrammes équivalent CO₂ du mix énergétique français et européen pour la production d'un kilowattheure est d'un facteur six (0,6 kg eq. CO₂ pour la production d'un kilowattheure électrique avec le mix énergétique européen et 0,1 kg eq. CO₂ pour le mix énergétique français, se référer aux tableaux donnés en Annexe A page 197), ce qui a un impact marqué sur les fronts de solutions dans le cas de ce moteur. Cet impact est logiquement situé du côté où l'énergie des pertes de fonctionnement est majoritaire dans l'énergie globale sur cycle de vie, c'est-à-dire les solutions de faible masse active. Toutefois, le changement du mix énergétique a un impact suffisant sur la solution d'énergie minimale pour faire réfléchir sur le choix d'une structure optimale.

Le dimensionnement de moteurs de petite puissance de ce type se montre sensible à des variations sur les coûts élémentaires liés à leur phase de fonctionnement.

3.4.2 Taux de recyclage des matières premières

Les optimisations précédentes ne considèrent que des matériaux issus de minerais, autrement dit les matériaux dont la production est la plus coûteuse vis-à-vis de l'environnement. Nous considérons ici le recyclage partiel de ces matériaux en introduisant un pourcentage de matière première recyclée dans le calcul de la production des parties actives. Nous proposons à la Figure 4.24 la comparaison de l'optimisation initiale et d'une nouvelle optimisation pour chaque matériau recyclé ainsi qu'une dernière avec l'ensemble des matériaux issus d'une filière de recyclage. Un extrait des coûts de production est proposé dans la Table 4.1. Nous ne proposons pas ici le recyclage du cuivre car le gain énergétique proposé dans la bases de donnée du logiciel Bilan Produit 2008 entre production de cuivre recyclé et cuivre courant est beaucoup trop faible pour être exploitable.

L'impact de l'utilisation de matériaux recyclés sur le front de solution est toujours positif, c'est-à-dire qu'il diminue naturellement la consommation d'énergie globale sur cycle de vie de la machine. Cependant, suivant d'une part la valeur du gain énergétique à utiliser un matériau recyclé ou non et d'autre part la proportion de son poids dans la masse totale de la machine, l'effet de l'utilisation de matériaux recyclés n'est pas toujours significatif car nous ne pouvons faire varier que la longueur active et non les sections de matériaux, donc leurs proportions. Dans le cas de ce moteur, le choix d'un circuit magnétique originaire d'une filière de recyclage est par exemple beaucoup plus bénéfique que le choix d'aluminium d'origine recyclée. Ainsi le choix d'aluminium recyclé diminue l'énergie globale sur cycle de vie de 4,3% alors qu'elle est diminuée de 34% dans le cas d'un circuit magnétique recyclé.

Table 4.1 – Coûts élémentaires énergétiques massiques de production pour les métaux de première et seconde main [BP0].

Phase du cycle de vie	Energie primaire, kWh
Extraction et production d'un kilogramme d'acier neuf	6,3
Production d'un kilogramme d'acier recyclé	2,4
Extraction et production d'un kilogramme d'aluminium	31,4
Production d'un kilogramme d'aluminium recyclé	6,2

La différence entre les fronts de Pareto se situe naturellement du côté des solutions de masse active les plus élevées. Nous constatons aussi un décalage du point d'énergie globale sur cycle de vie minimal suffisant pour justifier une reconsidération du choix de la structure optimale dans le cas d'utilisation d'acier d'origine recyclée dans la construction des tôles du circuit magnétique. Remarquons enfin que cette étude revient à étudier la sensibilité des résultats à une variation des coûts élémentaires, comme proposée au chapitre précédent.

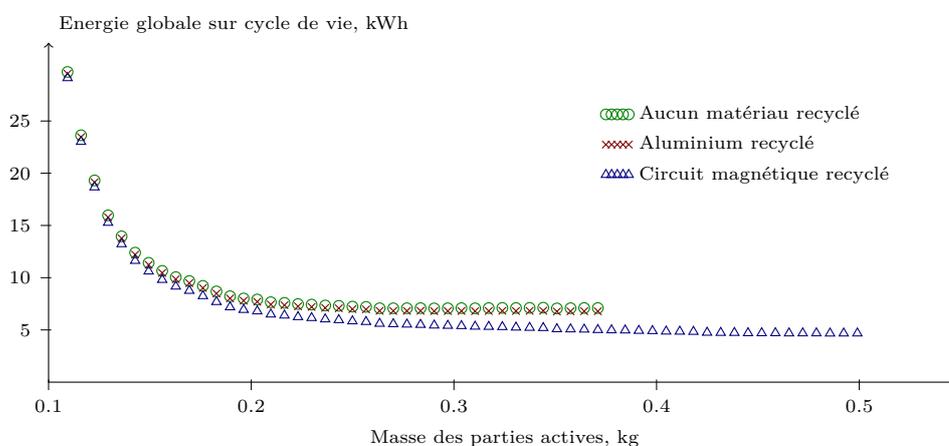


Figure 4.24 – Comparaison des fronts de solutions avec différents matériaux issus de première ou de seconde main.

3.5 Sensibilité aux choix des matériaux

Du point de vue de la production de matières premières, l'utilisation d'un kilogramme d'aluminium coûte plus cher à l'environnement que celle d'un kilogramme de cuivre (se référer à la Table 4.1). Nous choisissons ainsi de modéliser un moteur dont les barres sont en cuivre et non plus en aluminium, afin de déterminer dans quelle mesure la différence de coût environnemental est affectée par la différence des propriétés physiques des matériaux, à service utile identique. Dans un but de comparaison, nous modélisons aussi un moteur dont la cage et le bobinage sont en aluminium. Ces ensembles de solutions sont enfin comparés à la construction initiale, dont les bobinages sont en cuivre et les conducteurs rotoriques en aluminium. Les fronts de solutions obtenus sont représentés à la Figure 4.25.

La distribution des solutions se montre sensible au changement de matériau des barres. En effet, le minimum d'énergie globale sur cycle de vie est atteint avec des barres en cuivre pour une masse et un coût énergétique plus faible (6,8 kWh pour 0,33 kg) qu'avec des barres en aluminium (7,9 kWh pour 0,45 kg). En revanche, le choix du « tout aluminium » n'est pas à privilégier. Notons que la différence des distributions de solutions Pareto-optimales est principalement due aux propriétés physiques des matériaux et non pas à leurs impacts environnementaux dans ce cas de figure. En effet, les solutions Pareto-optimales obtenues dans le cas du « tout aluminium » d'origine recyclée présentent une distribution très proche de celle obtenue dans le cas du « tout aluminium » neuf.

La différence principale entre les ensembles de solutions se fait cependant sur l'énergie des pertes. En effet, les solutions de forte masse tendent à se rejoindre, montrant qu'au final les coûts de production des barres ou du bobinage ne sont pas prépondérants dans le calcul de l'énergie globale sur cycle de vie.

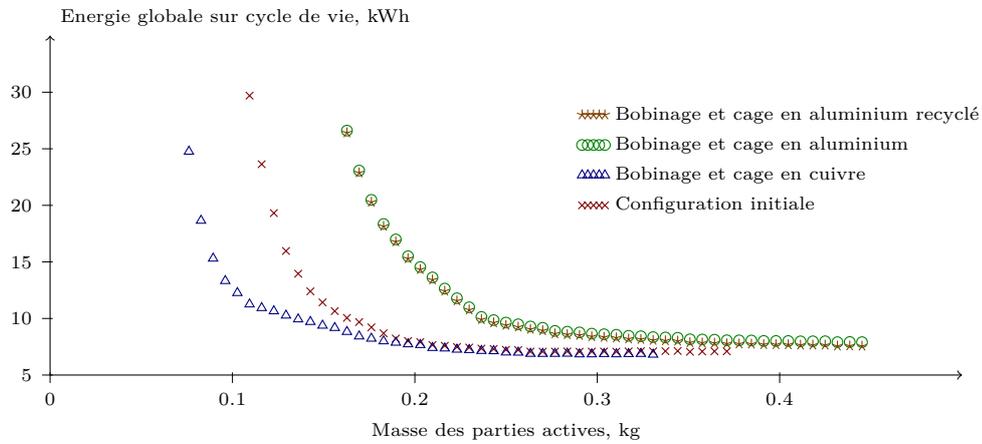


Figure 4.25 – Solutions après changement de la cage en cuivre ou du bobinage en aluminium.

3.6 Sensibilité aux dimensions radiales

Le découpage des tôles est fixé par les contraintes de l'application (diamètre d'application du tube et contraintes économiques). En supposant que nous puissions changer le tube d'enroulement et les tôles magnétiques, nous étudions la sensibilité des résultats à une variation homothétique des dimensions radiales des tôles statoriques et rotoriques.

Les répartitions de solutions satisfaisant à la contrainte thermique selon l'objectif d'énergie globale sur cycle de vie sont présentées à la Figure 4.26, pour différentes sections de découpage des tôles (toujours pour le même service, avec le même réducteur et sensiblement la même vitesse de rotation). Aux résultats de l'optimisation menée sur la géométrie initiale, nous comparons deux autres optimisations, à fonctionnement identique (un cycle aller-retour par jour). La première présente une section plus grande d'un facteur homothétique 1,2 et la seconde une section plus faible d'un facteur homothétique 0,8.

Nous observons ici le croisement des différents fronts de solutions. En effet, une diminution de la section du circuit magnétique est intéressante du point de vue de l'énergie nécessaire à la production, au transport et de tous les coûts environnementaux liés à la masse. Par contre, cette diminution de section entraîne une augmentation de la saturation d'un moteur déjà fortement saturé et une augmentation des pertes de fonctionnement pour atteindre le même couple (plus de pertes Joule). Dans le cas contraire, une augmentation de la section du circuit magnétique augmente l'énergie globale sur cycle de vie, mais permet d'aller chercher des solutions de masse plus faible sans pour autant rencontrer la contrainte thermique. La géométrie initiale représente un compromis entre les deux valeurs d'homothétie. Le minimum d'énergie globale sur cycle de vie est obtenu à 6.8 kWh et 0,37 kg pour le facteur homothétique de 0,8, à 7.6 kWh et 0,39 kg pour le facteur homothétique de 1,2 et à 7.1 kWh et 0,37 kg pour la configuration initiale.

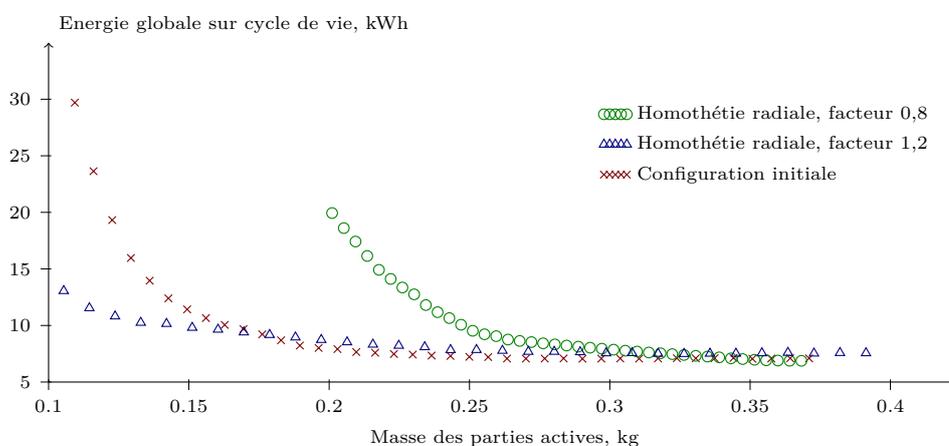


Figure 4.26 – Fronts de solutions après homothétie radiale de la découpe des tôles du circuit magnétique d'un facteur 0,8 et 1,2.

Dans le cas de ces moteurs, le cycle de fonctionnement est tel que l'impact d'une modification géométrique comme la diminution de la section du circuit magnétique permet d'atteindre une solution d'énergie globale sur cycle de vie plus faible malgré une augmentation significative des pertes de fonctionnement. L'effet de ce changement géométrique reste cependant trop limité sur la valeur du minimum d'énergie globale sur cycle de vie pour qu'une refonte complète des chaînes de production et de montage ne soit envisagée.

Notons enfin que dans le cas des solutions de faible masse, réduire l'énergie globale sur cycle de vie peut se faire par une augmentation des dimensions radiales (en changeant de front de Pareto) ou une augmentation de la masse (sans changer de front de Pareto). Par exemple, en partant d'une solution sur le front de Pareto initial de 20 kWh ; 0,12 kg, augmenter les dimensions radiales d'un facteur 1,2 permet de diviser quasiment par deux l'énergie globale sur cycle de vie donnant une solution de 11 kWh ; 0,12 kg. En conservant la même découpe des tôles du circuit magnétique, il faut augmenter la masse de 25 % pour atteindre la même énergie globale sur cycle de vie et la solution de 11 kWh ; 0,16 kg. Ceci n'est pas valable dans le cas des solutions de masse active maximale.

Conclusion

Les impacts environnementaux qui constituent nos objectifs d'optimisation sont, dans ce chapitre, l'énergie globale sur cycle de vie et le potentiel de réchauffement climatique.

Nous avons proposé une modélisation adaptée à des machines asynchrones dédiées à l'entraînement de volets roulants puis une optimisation de leur performance environne-

mentale sur la base de seulement deux paramètres : la longueur active et le nombre de spires par phase. Cette modélisation est effectuée par éléments finis dans un contexte de fonctionnement fortement saturé et sur une machine présentant des effets 3D significatifs. Ceci nous a amené à considérer une modélisation par éléments finis 2D secondée d'un post-traitement prenant en compte les effets 3D. La modélisation est menée par l'intermédiaire d'une alimentation à courant imposé. Les simulations sont ensuite ramenées en alimentation en tension en considérant une machine diphasée équilibrée. Cette hypothèse est validée expérimentalement dans la plage de vitesse considérée dans les optimisations. Cette modélisation est validée sur des relevés expérimentaux d'une demi-douzaine de machines. Notons de plus que le régime de fonctionnement thermique est purement transitoire, modélisé par un fonctionnement adiabatique. Pour des raisons de temps de simulation, l'optimisation est ensuite menée sur la base d'une batterie de calculs systématiques réalisés par éléments finis non linéaires en magnétodynamique.

L'optimisation sur cycle de vie de ce type de moteur est justifiée par un faible ratio entre la durée cumulée de fonctionnement et la durée de vie totale, proposant ainsi un très bon support à l'application de critères environnementaux lors de leur conception.

Un changement du mix énergétique de la production d'électricité tout comme une prise en compte de matériaux de seconde main plutôt que nouvellement extraits conduit à des variations significatives sur la distribution des solutions optimales. Ce point, fondamental au regard de la précision et de l'origine des bases de données d'analyse sur cycle de vie, nous amène, dans le cadre restrictif de cet exemple, à souligner la sensibilité des résultats aux variations des impacts environnementaux extraits des bases de données d'inventaires d'analyse sur cycle de vie.

Les résultats d'optimisation sont aussi sensibles au nombre de cycles de fonctionnement dans ce type d'application et à la durée de vie. Nous avons défini à cette occasion un rendement sur cycle de vie. Ce rendement est représentatif de l'ensemble des consommations énergétique du moteur sur son cycle de vie plutôt que sur sa seule phase de fonctionnement. Il atteint un optimum contrairement au rendement sur cycle de fonctionnement qui n'est pas approprié à ce type d'application.

Le remplacement de l'aluminium des barres rotoriques par du cuivre propose des solutions d'optimisation plus intéressantes que celles obtenues avec un moteur à cage en aluminium et bobinage en cuivre. Le changement du matériau de bobinage du cuivre à l'aluminium est quant à lui moins intéressant. Ce fait est justifié par la plus forte résistivité de l'aluminium plutôt que par son coût environnemental de production élevé. Toutefois, ces changements vont dépendre de paramètres industriels de production spécifiques qui ne sont pas pris en compte dans ces simulations. Notons de plus que ce changement de matériau se fait à section d'encoche constante, limitant la comparaison des propriétés physiques au volume plutôt qu'à la masse. Cette comparaison n'est donc pas en défaveur de l'aluminium.

Une homothétie radiale sur les tôles (dont la découpe est en réalité contrainte par l'application) nous a montré que les résultats d'optimisation sont sensibles à une homothétie radiale sur la définition du découpage des tôles du moteur. Cependant les variations obtenues ne sont pas suffisamment intéressantes du point de vue des objectifs pour justifier une refonte complète des chaînes de production et de montage. Trop peu de cas ont été traités pour pouvoir parler d'optimum de dimensions radiales. Notons toutefois que le point de minimum d'énergie globale sur cycle de vie n'est pas touché par ces variations de dimensions radiales.

Les fronts de Pareto proposent un ensemble de solutions sans privilégier d'objectif. Il se pose toujours la question du choix de la solution optimale. D'un point de vue strictement éco-conscient, nous privilégierons naturellement les impacts environnementaux, représentés ici par E_{acv} ou le potentiel de réchauffement climatique. Les moteurs optimisés dans ce chapitre sont prévus pour des applications stationnaires, limitant l'importance d'une augmentation de leur masse devant celle d'une diminution de l'énergie globale sur cycle de vie. Des normes plus restrictives sur la consommation d'énergie globale sur cycle de vie devraient à terme décaler le choix de la solution optimale vers les masses plus élevées.

Machine asynchrone triphasée à fréquence variable

Introduction

Concevoir et fabriquer des moteurs fiables avec de bonnes performances suppose un juste équilibre entre de nombreux facteurs comme le rendement et le coût mais aussi, plus techniquement, l'alimentation, les organes de roulement, le type de refroidissement, etc.

Le chapitre précédent concernait un modèle spécifique de machine asynchrone à alimentation fixe et au paramétrage contraint. Les travaux de ce chapitre ont pour but de confirmer tout d'abord l'intérêt d'une approche d'éco-conception par rapport à une approche classique dans le cas d'une multiplication des paramètres de modélisation. Nous soulignons ensuite l'importance de l'alimentation dans l'optimisation ainsi qu'un comportement spécifique des résultats d'optimisation vis-à-vis du nombre de paires de pôles. Enfin nous réalisons des études de sensibilité des résultats d'optimisation aux effets d'échelles (par l'intermédiaire d'un changement du niveau de puissance nominale de la machine), à la durée d'utilisation, au conditionnement (par l'intermédiaire d'une amélioration du refroidissement) et enfin à la prise en compte des parties inactives de la machine asynchrone.

Par choix, la prise en compte des impacts environnementaux du moteur électrique se résume dans ce chapitre à l'énergie globale sur cycle de vie. Les calculs de modélisations mécaniques, électriques et thermiques sont reportés en annexes, respectivement en Annexe E page 235, en Annexe F page 241 et en Annexe G page 251.

Nous n'avons pas trouvé, à ce jour, de données concernant les impacts environnementaux des éléments constitutifs des convertisseurs statiques. Ainsi nous arrêtons notre étude au niveau de l'alimentation par spire de la machine sans remonter, par l'intermédiaire du nombre de spires par phase, au dimensionnement du convertisseur statique.

1. Modélisation de la machine

Nous considérons un moteur asynchrone constitué d'un stator comportant un enroulement triphasé à p paires de pôles et d'un rotor à cage. Les trois enroulements statoriques sont alimentés par un système de tensions triphasées équilibrées directes. Les calculs se font au premier harmonique en régime permanent électrique et mécanique.

1.1 Mise en place de l'étude

1.1.1 Géométrie de la machine

La géométrie de la machine asynchrone est présentée à la Figure 5.1. Les grandeurs descriptives regroupées ici ne présentent pas nécessairement des paramètres d'optimisation du fait notamment de définitions redondantes. Nous définissons ainsi l'épaisseur de la culasse statorique e_{cs} et rotorique e_{cr} , la hauteur d'encoche statorique h_{es} et rotorique h_{er} , le rayon intérieur rotorique R_{ir} , l'épaisseur des isthmes d'encoches statoriques e_{is} et rotoriques e_{ir} , la hauteur des isthmes d'encoches statorique h_{is} et rotorique h_{ir} , la hauteur d'entrefer h_e , le nombre d'encoches statoriques N_s et rotoriques N_r et enfin la longueur active de l'épaisseur de tôles L_a .

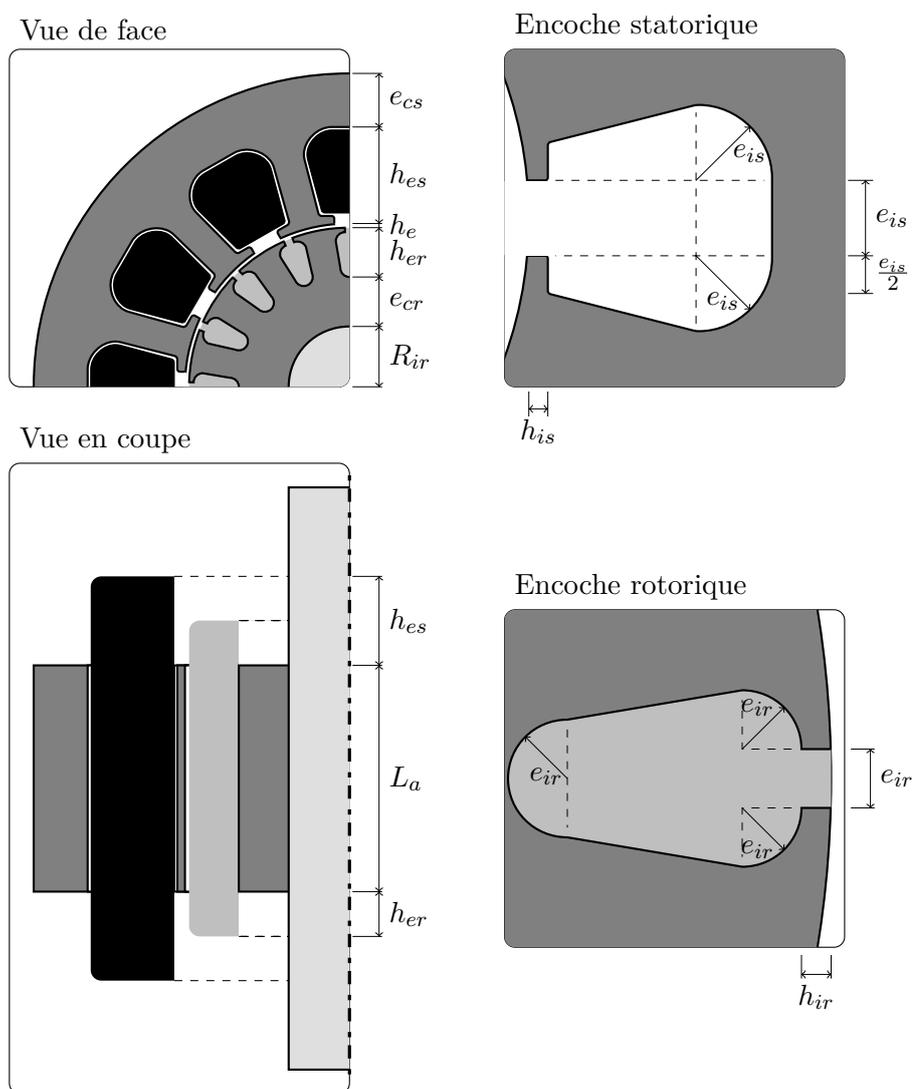


Figure 5.1 – Représentation géométrique du modèle de machine asynchrone triphasée et définition des principales grandeurs géométriques.

Nous définissons de même différents diamètres de la machine afin de simplifier les expressions analytiques. Au stator et au rotor, nous avons ainsi le diamètre extérieur et intérieur D_{es} , D_{is} , D_{er} et D_{ir} ainsi que les diamètres de fonds d'encoches, D_{fs} et D_{fr} . A ceci s'ajoutent les diamètres moyens de culasse statorique D_{cs} et d'entrefer D_e .

$$D_{ir} = 2R_{ir} \quad D_{fr} = D_{ir} + 2h_{cr} \quad D_{er} = D_{fr} + 2h_{er} \quad (5.1a)$$

$$D_{is} = D_{er} + 2h_e \quad D_{fs} = D_{is} + 2h_{cs} \quad D_{es} = D_{fs} + 2h_{cs} \quad (5.1b)$$

$$D_{cs} = D_{fs} + h_{cs} \quad D_e = D_{er} + h_e \quad (5.1c)$$

Enfin pour le calcul des contraintes d'induction, nous définissons l'épaisseur des dents statoriques e_{ds} et rotoriques e_{dr} et le pas d'encoche d_s statorique et rotorique d_r .

$$d_s = \frac{\pi D_{is}}{N_s} \quad d_r = \frac{\pi D_{er}}{N_r} \quad (5.2)$$

1.2 Calcul de masse

1.2.1 Masse des parties actives

Nous définissons les sections d'une encoche statorique S_{es} et rotorique S_{er} . Nous avons d'après la schématisation présentée à la Figure 5.1 :

$$S_{es} = \frac{e_{is}}{2} [e_{is}(\pi - 3) + 5h_{es} - 5h_{is}] \quad S_{er} = \frac{e_{ir}}{2} [2e_{ir}(\pi - 4) + (5h_{es} - 3h_{ir})] \quad (5.3)$$

Nous définissons L_r la longueur des conducteurs rotoriques inclinés d'un pas d'encoche d'après l'équation (F.5), présentée en Annexe F, page 243. En notant k_r le coefficient de remplissage du cuivre dans les encoches statoriques, k_{lam} le coefficient de foisonnement de l'empilement de tôles, ρ_c , ρ_{al} et ρ_f la masse volumique respectivement du cuivre de l'aluminium et du fer, les masses des trois constituants actives de la machine (M_b pour la masse du bobinage incluant les têtes de bobines, M_c pour celle de la cage incluant les anneaux de court-circuit et M_{cm} pour celle du circuit magnétique) permettent d'écrire

l'expression de la masse totale des parties actives de la machine asynchrone $M_{ac} = M_b + M_c + M_{cm}$.

$$M_{cm} = \rho_f \left[\frac{\pi}{4} (D_{es}^2 - D_{is}^2 + D_{er}^2 - D_{ir}^2) L_a k_{lam} - N_s (S_{es} + h_{is} e_{is}) L_a k_{lam} - N_r S_{er} L_r \right] \quad (5.4a)$$

$$M_b = k_r \rho_c N_s \left[L_a k_{lam} S_{es} + 2h_{es} + \frac{\pi}{4p} (D_{fs} - h_{es}) \right] \quad (5.4b)$$

$$M_c = \rho_{al} \left[N_r L_r S_{er} + h_{er} \frac{\pi}{2} (D_{er}^2 - D_{fr}^2) \right] \quad (5.4c)$$

1.2.2 Masse des parties inactives

Du point de vue des impacts environnementaux, une masse de matériau a le même impact, relativement au type de matériau, quelle soit active ou non. Il convient donc de l'optimiser avec autant de considération.

L'estimation théorique de la masse des parties inactives à partir des données géométriques des parties actives de la machine est délicate, du fait notamment de la variété des spécificités technologiques de construction. Nous proposons ainsi une modélisation simplifiée des parties inactives spécifique à ce type de machine, afin d'introduire un ordre de grandeur de leur coût environnemental dans la conception, plutôt qu'un calcul précis de la masse des parties inactives qui sortirait du cadre de cette étude.

Les calculs de modélisation mécanique, dont le calcul de la masse des parties inactives, sont reportés en Annexe E, page 235.

1.3 Modélisation électrique de la machine

1.3.1 Schéma électrique monophasé équivalent par spire

La machine étant triphasée équilibrée, nous réduisons les équations d'une de ses phases à celle du circuit électrique équivalent de la Figure 5.2 qui nous permet de déterminer l'expression du couple développé par la machine [Pou98]. Nous incluons les pertes fer dans le schéma sous la forme d'une résistance équivalente en parallèle avec l'inductance magnétisante. Notons qu'il ne s'agit pas d'une résistance à l'image de la résistance du bobinage statorique ou de la cage rotorique, car sa valeur dépend de la pulsation des courants d'alimentation. Il nous faut donc la calculer pour chaque fréquence d'alimentation

de la machine. Les inductances de fuites sont séparées et réparties entre le stator et le rotor, leur calcul se faisant d'après la géométrie de la machine.

La connaissance du nombre de spires par phase n'est pas nécessaire afin d'étudier la machine asynchrone seule, celui-ci n'étant utile que pour son adaptation au convertisseur statique qui l'alimente. Afin de simplifier les expressions électriques, nous généralisons l'ensemble du modèle de la machine asynchrone à un « modèle par spire » dans lequel tous les paramètres électriques sont exprimés comme si le bobinage statorique n'avait qu'une seule spire remplissant complètement les encoches, à facteur de remplissage constant.

Nous définissons ainsi la tension par spire aux bornes d'une phase de la machine asynchrone v_s , la tension par spire aux bornes de la perméance magnétisante e_s ainsi que les ampères.tours statoriques i_s et rotoriques ramenés au stator i_r . Au niveau des composants, nous définissons la résistance spécifique du bobinage d'une phase statorique r_s , la perméance équivalente aux flux de fuites statoriques \mathcal{P}_s , la perméance magnétisante \mathcal{P}_μ , la résistance spécifique équivalente aux pertes fer r_f , la perméance équivalente aux flux de fuites rotoriques ramenée au stator \mathcal{P}_r , la résistance spécifique de la cage rotorique ramenée au stator r_r , les pulsations des courants statoriques ω_s et rotoriques ω_r .

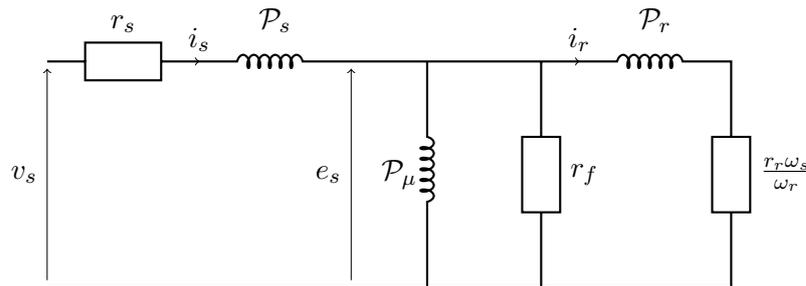


Figure 5.2 – Schéma électrique équivalent monophasé par spire de la machine asynchrone.

Le calcul des éléments du schéma de la Figure 5.2, d'après la géométrie de la machine, est reporté en Annexe F, page 241.

1.3.2 Calcul du couple

Nous divisons le schéma présenté à la Figure 5.2 en trois impédances représentatives de la partie statorique z_s , rotorique z_r et une dernière regroupant la perméance magnétisante ainsi que les pertes fer z_m .

$$z_s = r_s + j\mathcal{P}_s\omega_s \quad z_r = \frac{r_r\omega_s}{\omega_r} + j\mathcal{P}_r\omega_s \quad z_m = \frac{j r_f \mathcal{P}_\mu \omega_s}{r_f + j\mathcal{P}_\mu \omega_s} \quad (5.5a)$$

Le couple de la machine s'écrit donc

$$C_e = 3 \frac{r_r p}{\omega_r} \left| \frac{z_m}{z_s z_m + z_s z_r + z_m z_r} \right|^2 v_s^2 \quad (5.5b)$$

1.3.3 Contrainte d'induction

Comme dans le cas du transformateur (se référer au Chapitre 3, à la section §2.2 page 81) et pour les mêmes raisons, le niveau maximal d'induction dans le circuit magnétique de la machine est contraint à une valeur maximale. Nous écrivons les expressions des inductions dans la culasse et dans les dents, au stator et au rotor. Celles-ci sont aussi utilisées pour calculer les pertes fer.

Maximum d'induction magnétique dans l'entrefer. La tension efficace par spire e_s aux bornes de la perméance magnétisante est liée au flux maximum embrassé par une spire d'une phase $\hat{\varphi}_e$ qui s'exprime en fonction du maximum d'induction magnétique d'entrefer \hat{B}_e par intégration sur la surface d'entrefer. Nous avons ainsi :

$$\hat{B}_e = \frac{\sqrt{2} p e_s}{D_e L_a k_{lam} \omega_s} \quad (5.6)$$

Maximum d'induction magnétique dans la culasse statorique et rotorique. Le flux résultant embrassé par une phase statorique se divise en direction de chaque pôle dans la culasse statorique. Ce flux se retrouve aussi au niveau de la culasse rotorique. Nous intégrons ces flux sur les sections de culasses pour obtenir l'expression du maximum d'induction magnétique :

$$\hat{B}_{cs} = \frac{\sqrt{2} e_s}{2 h_{cs} L_a k_{lam} \omega_s} \quad \hat{B}_{cr} = \frac{\sqrt{2} e_s}{2 h_{cr} L_a k_{lam} \omega_s} \quad (5.7)$$

Maximum d'induction magnétique dans les dents statoriques et rotoriques. Le calcul de ces maxima d'induction magnétique prend en compte le fait qu'il apparait une concentration de flux dans les dents au stator comme au rotor. Le flux magnétique résultant sous un pas polaire se répartit entre les dents de chaque phase. Nous considérons le pas d'encoche statorique sous lequel se situe le maximum d'induction d'entrefer. Nous supposons ensuite que le flux magnétique résultant de l'intégration de l'induction sous ce pas polaire se

concentre entièrement dans la dent. En supposant que ce flux se concentre uniquement dans la dent située sur le pas d'encoche considéré et que l'induction est identique sur la section de cette dent, il suffit de diviser l'expression du flux maximal sous le pas d'encoche par la section de la dent. Ainsi nous avons :

$$\hat{B}_{ds} = \frac{\sqrt{2}e_s}{e_{ds}L_a k_{lam}\omega_s} \sin\left(\frac{\pi p}{N_s}\right) \quad \hat{B}_{dr} = \frac{\sqrt{2}e_s}{e_{dr}L_a k_{lam}\omega_s} \sin\left(\frac{\pi p}{N_r}\right) \quad (5.8)$$

1.3.4 Validation par éléments finis

La modélisation électromagnétique analytique de la machine est validée par éléments finis sur un calcul de couple en linéaire à courant d'alimentation identique. Nous simulons avec le logiciel d'élément finis FEMM [FEM] plusieurs structures de machine selon le modèle défini à la Figure 5.1. Nous proposons à la Figure 5.3 le tracé d'une des géométries utilisées pour la validation du modèle analytique et à la Figure 5.3 le tracé du couple et des inductions pour cette machine. Cette vérification se fait sous 100 A.tours. Ses dimensions principales sont : $D_{es} = 40$ mm, $D_e = 20$ mm, $D_{ir} = 8$ mm, $h_e = 0.2$ mm, $h_{cs} = 4$ mm, $h_{cr} = 3$ mm, $L_a = 50$ mm.

Dans les culasses rotorique et statorique, l'induction magnétique est moyennée sur une ligne radiale coupant la culasse tous les demi-pas d'encoches. La valeur maximale est ensuite gardée pour la comparaison avec le modèle analytique. Un calcul similaire, pour le calcul du niveau d'induction dans les dents rotoriques et statoriques, est répété sur une ligne coupant chaque dent à sa demi-hauteur.

1.3.5 Bilan d'énergies

Pertes de fonctionnement. Les pertes mécaniques ne sont pas considérées dans cette modélisation. La somme des pertes fer et des pertes Joule, intégrée sur la durée de fonctionnement, donne la consommation d'énergie sur la durée d'utilisation.

Les pertes fer. Celles-ci sont estimées à partir de la formulation empirique de Steinmetz en régime sinusoïdal [Liw67]. Nous négligeons les pertes fer au rotor du fait de la faible fréquence de l'induction dans cette partie du circuit magnétique. L'intégration des pertes fer sur le volume du circuit magnétique statorique se décompose en deux parties : la culasse et les dents. Ainsi, nous avons :

$$P_f = L_a k_{lam} \left(4k_H f_s + 2k_{cf} (\pi f_s)^2 \right) \left(N_s e_{ds} h_{es} \hat{B}_{ds}^2 + \pi h_{cs} D_{fs} \hat{B}_{cs}^2 \right) \quad (5.9)$$

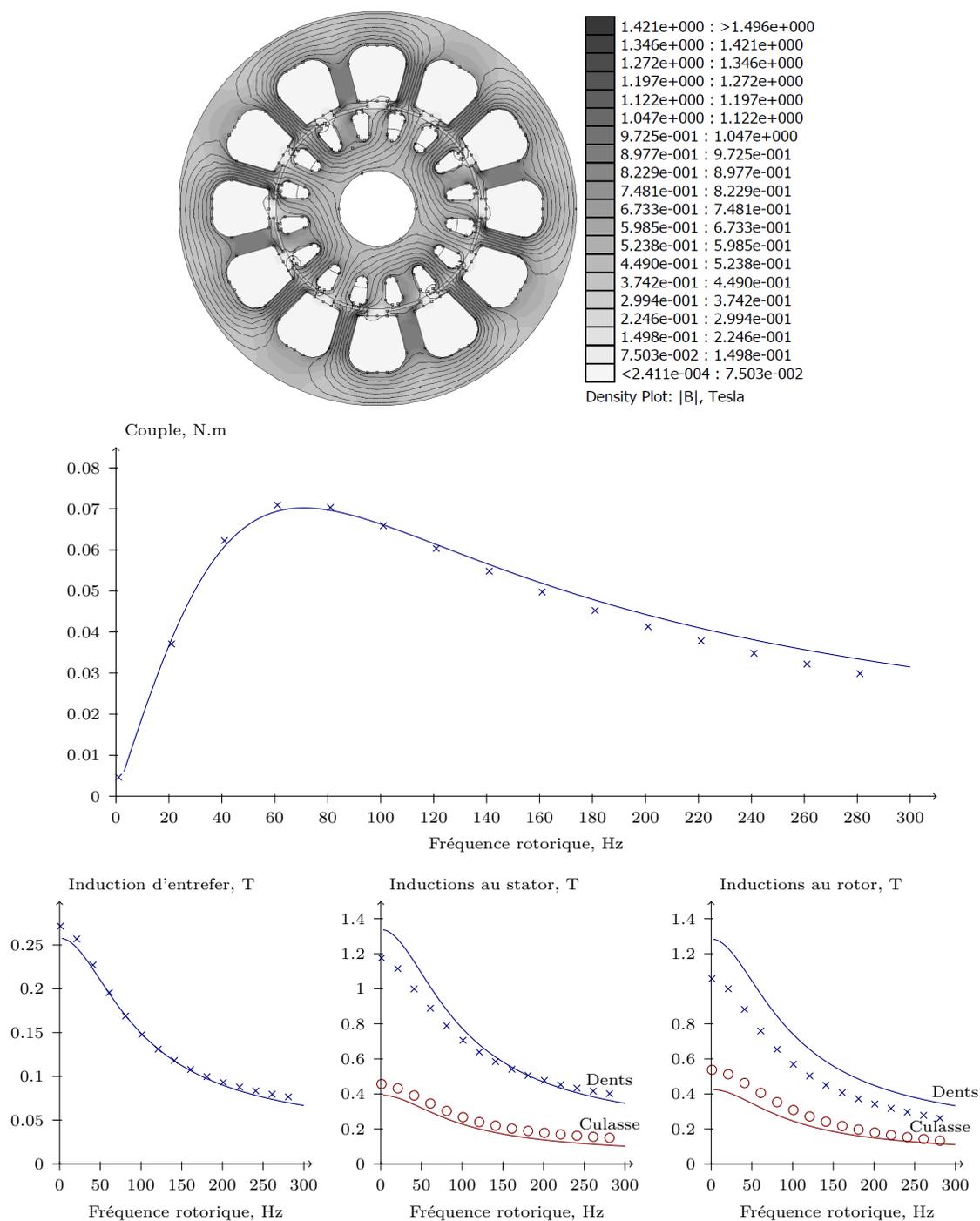


Figure 5.3 – Tracé d'une machine asynchrone triphasée par élément finis pour validation du modèle analytique. Comparaison des calculs analytiques (traits) et par éléments finis (points) à amplitude constante de courant d'alimentation sur le couple, l'induction dans l'entrefer, l'induction dans la culasse et dans les dents.

Les pertes par effet Joule s'obtiennent à partir de l'échauffement des enroulements soumis au passage des courants dans le bobinage statorique et dans la cage. Nous exprimons les pertes Joule à partir du schéma électrique équivalent monophasé par spire.

$$P_J = 3r_s i_s^2 + 3r_r i_r^2 \quad (5.10)$$

Energie globale sur cycle de vie. Le calcul de l'énergie globale sur cycle de vie de la machine est identique à celui conduit au Chapitre 3 aboutissant à l'équation (3.8), page 76. Un extrait comportant les chiffres utilisés dans les simulations sur le modèle de la machine asynchrone triphasée est présenté au Chapitre 3, Table 3.1 page 76.

1.4 Modélisation thermique de la machine asynchrone

Le modèle thermique adopté permet une modélisation avec un nombre réduit de nœuds, quasiment toutes les résistances thermiques pouvant être déduites de la géométrie de la machine [BCLP03]. La contrainte thermique imposée aux optimisations porte sur la température maximale que peuvent supporter les isolants électriques au niveau des enroulements avant de perdre leurs propriétés diélectriques.

Nous admettons que la température des isolants est identique à celle des enroulements. Nous négligeons les flux thermiques axiaux autres que dans l'arbre. De plus, nous supposons que l'influence de la ventilation n'implique pas de dissymétrie sur la distribution de température axiale. Nous négligeons enfin la résistance thermique radiale de conduction dans le carter, les flasques et la cage. Nous proposons dans la Table 5.1 la description des éléments thermiques intervenant dans la modélisation thermique de la machine. Le calcul de ces résistances est reporté en Annexe G, page 251.

Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, la comparaison entre la composante E_{mat} et E_{fct} dans l'énergie globale sur cycle de vie peut se faire en jouant sur la durée d'utilisation du composant étudié. A partir de la connaissance des constantes de temps thermique du composant, il est possible de poser des limites, permettant notamment de spécifier quand les données mises en jeu nécessitent une modélisation thermique en régime transitoire thermique. La modélisation en régime thermique transitoire est traitée dans le cas du transformateur et de la machine asynchrone monophasée. L'intérêt du modèle thermique n'étant pas perdu par une étude régime permanent thermique sur des durées d'utilisations suffisantes, nous limitons les modélisations de ce chapitre à ce cas de figure.

Table 5.1 – Description des résistances thermiques intervenant dans la modélisation thermique de la machine asynchrone.

Description	Nom
Convection entre le carter et l'air ambiant	$\mathcal{R}_{c,0}$
Convection entre l'air interne et les flasques	$\mathcal{R}_{i,f}$
Conduction radiale dans la partie extérieure de la culasse statorique	\mathcal{R}_{cs1}
Conduction radiale dans la partie intérieure de la culasse statorique	\mathcal{R}_{cs2}
Conduction radiale dans la culasse rotorique	\mathcal{R}_{cr}
Conduction radiale dans les dents statoriques	\mathcal{R}_d
Conduction entre le bobinage statorique et les encoches statoriques	\mathcal{R}_b
Convection entre les têtes de bobines et le carter	$\mathcal{R}_{b,c}$
Convection entre le bobinage et le circuit magnétique statorique	$\mathcal{R}_{b,cs}$
Convection entre les têtes de bobines et l'air interieur	$\mathcal{R}_{b,i}$
Convection entre les dents statoriques et l'air d'entrefer	$\mathcal{R}_{s,e}$
Convection entre le rotor et l'air d'entrefer	$\mathcal{R}_{r,e}$
Convection entre le rotor et le stator via l'entrefer	\mathcal{R}_e
Conduction de l'interface entre le circuit magnétique statorique et le carter	$\mathcal{R}_{cs,c}$
Conduction axiale dans l'arbre	\mathcal{R}_a
Conduction entre le circuit magnétique rotorique et l'arbre	$\mathcal{R}_{cr,a}$
Conduction entre les roulements et les flasques	$\mathcal{R}_{r,f}$
Conduction entre le carter et les flasques	$\mathcal{R}_{f,c}$
Conduction dans les roulements	\mathcal{R}_r

La schématisation équivalente électrique du modèle thermique, proposée à la Figure 5.4, nous permet d'exprimer analytiquement l'élévation de température du bobinage par rapport à l'air ambiant. Nous notons $\Delta\theta_{cm,0}$, $\Delta\theta_{b,0}$, $\Delta\theta_{r,0}$, $\Delta\theta_{c,0}$ et $\Delta\theta_{f,0}$ la différence de température entre l'air ambiant et respectivement le circuit magnétique, le bobinage, le rotor et le carter et les flasques.

Le calcul analytique est plus long que dans le cas du transformateur et n'est pas retranscrit dans ce mémoire. Nous résolvons le système linéaire obtenu par l'établissement de lois des nœuds en différents points du circuit représenté à la Figure 5.4 ce qui nous donne l'expression de l'élévation de température du bobinage en fonction des pertes de fonctionnement. Le calage du modèle n'est pas envisagé ici, l'ensemble des coefficients thermiques étant pris dans la littérature et cités dans les calculs en Annexe G, page 251.

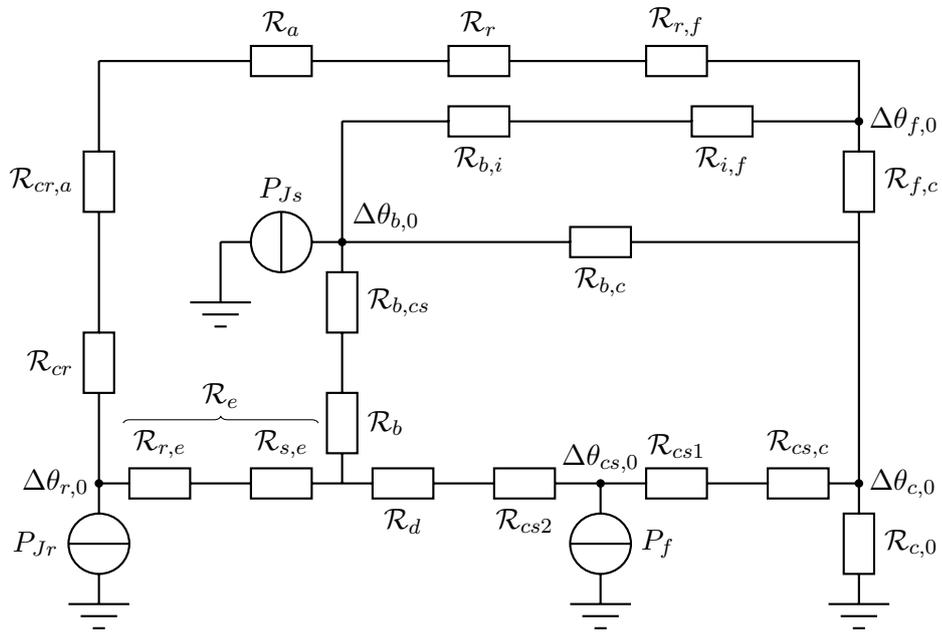


Figure 5.4 – Schéma électrique équivalent en régime thermique permanent de la machine.

2. Mise en place des simulations

2.1 Considérations préalables

La machine asynchrone est utilisée chaque jour sur une durée arbitraire de dix ans. Nous sélectionnons pour cette machine un cycle défini par un seul point de couple, de vitesse et une durée d'utilisation par jour.

2.2 Paramètres et contraintes d'optimisation

2.2.1 Circuit magnétique

Nous limitons le nombre de paramètres d'optimisation aux éléments descriptifs essentiels. En effet, un paramétrage fin de la machine complexifierait inutilement la modélisation dans le cadre de ces travaux exploratoires tout en augmentant les temps de simulation. Ces considérations géométriques sont résumées dans la Table 5.2.

Table 5.2 – Données géométriques fixées dans les optimisations et expressions correspondantes.

Donnée	Contrainte
Epaisseur d'entrefer, m [SL92]	$h_e = 2.10^{-4} + 3.10^{-3} \sqrt{D_e L_a / 2}$
Nombre d'encoches par pôle et par phase	$m_s = 3$
Nombre d'encoches au rotor	$N_r = N_s + 1$

2.2.2 Arbre

Le rayon de l'arbre chargé de transmettre le couple utile subit une contrainte mécanique en fonction du couple extérieur de torsion qui lui est imposé. Nous choisissons dans nos simulations un rayon d'arbre minimal tel qu'il puisse transmettre le couple maximal défini dans le cahier des charges avec une bonne résistance à la fatigue mécanique [ALR04]. Le calcul du rayon minimal est reporté en Annexe E, section §2 page 239. Il nous vient l'expression, en notant \hat{C} le couple maximal :

$$R_{ir} \geq \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{16\sqrt{3}\hat{C}}{\pi\sigma_e}} \quad (5.11)$$

Nous comparons à la Figure 5.5 les diamètres d'arbre obtenus par la relation (5.11) et ceux proposés dans le catalogue technique de machines asynchrones triphasées à cage Leroy Somer (gamme 0,09 à 30 kW) en fonction de leur couple nominal [LS98].

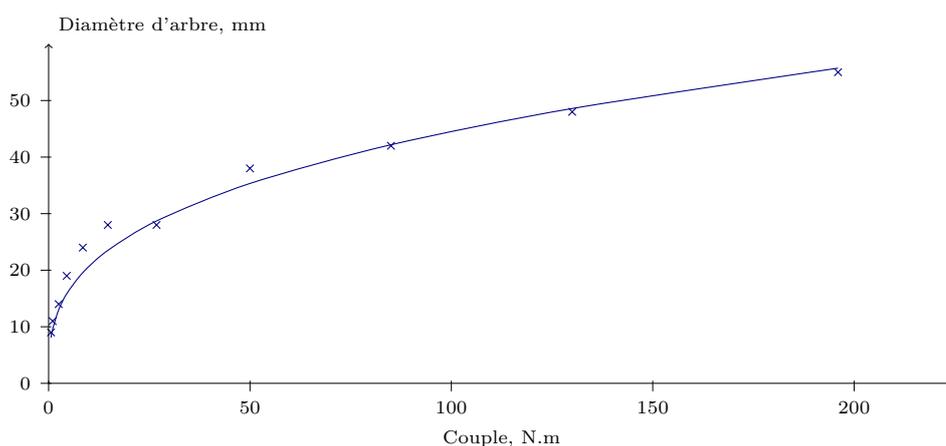


Figure 5.5 – Comparaison du diamètre d'arbre calculé d'après l'expression (5.11) à partir du couple nominal (trait plein) et avec les valeurs (points) issues du catalogue technique de machines asynchrones triphasées à cage Leroy Somer, gamme 0,09 à 160 kW (points).

La valeur minimale de R_{ir} dépend du choix de la contrainte d'élasticité σ_e . Dans le cas de cylindres de construction mécanique, la contrainte limite de sécurité est prise inférieure à la contrainte du matériau constitutif de l'arbre pris séparément. La valeur de cette contrainte dépend des conditions locales et du métal utilisé mais se situe généralement entre 10 et 100 MPa [Tou69].

2.2.3 Paramètres d'optimisation

Avant de dimensionner concrètement le modèle de machine asynchrone nous définissons le domaine de variation des paramètres d'optimisation. Ces paramètres portent sur la géométrie de la machine et le choix de son alimentation. Leur fourchette de variation est regroupée dans la Table 5.3.

Le paramètre de proportion encoche-dent est défini sous la forme d'un coefficient appliqué à l'angle d'ouverture d'une encoche, présenté à la Figure 5.6 dans le cas statorique. L'encoche est réduite à zéro quand $k_{es} = 0$ et il n'y a pas de dent pour $k_{es} = 1$.

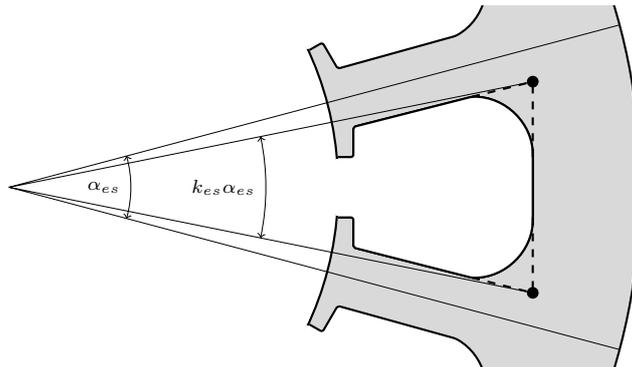


Figure 5.6 – Définition du coefficient de proportion encoche-dent sur un pas d'encoche statorique.

A partir de ces paramètres, toutes les grandeurs géométriques se calculent par l'intermédiaire de relations simples. Cette paramétrisation évite notamment de définir des contraintes géométriques supplémentaires qui apparaîtraient avec l'utilisation directe des grandeurs définies à la section §1.1.1, page 146. Aux paramètres géométriques s'ajoutent ceux de l'alimentation de la machine. Celle-ci est décrite par les valeurs de la tension et de la pulsation statorique. Nous précisons ce point à la section §2.3, page 159.

Table 5.3 – Fourchette de variation des paramètres d'optimisation de la machine asynchrone.

Paramètres	Fourchette
Longueur du paquet de tôles, m	$2 \cdot 10^{-3} \leq L_a \leq 1$
Nombre de paires de pôles	$1 \leq p \leq 10$
Diamètre intérieur rotorique, m	$10^{-3} \leq D_{ir} \leq 1$
Hauteur de culasse rotorique, m	$10^{-3} \leq h_{cr} \leq 1$
Hauteur d'encoche rotorique, m	$10^{-3} \leq h_{er} \leq 1$
Hauteur d'encoche statorique, m	$10^{-3} \leq h_{es} \leq 1$
Hauteur de culasse statorique, m	$10^{-3} \leq h_{cs} \leq 1$
Proportion encoche-dent sur un pas d'encoche rotorique	$0 \leq k_{er} \leq 1$
Proportion encoche-dent sur un pas d'encoche statorique	$0 \leq k_{es} \leq 1$
Tension d'alimentation, V/spire	$0 \leq v_s \leq 10$
Fréquence d'alimentation, Hz	$0 \leq f_s \leq 10^3$

2.2.4 Contraintes d'optimisation

L'optimisation des dimensions de la machine asynchrone se fait sous deux contraintes : une butée d'induction magnétique et une butée en température sur le bobinage. Les valeurs des contraintes est identiques à celles sélectionnées dans le cas du transformateur monophasé, résumées au Chapitre 3, Table 3.3 page 82.

2.3 Optimisation de l'alimentation

2.3.1 Points de fonctionnement

Le chapitre précédent traite d'un modèle de machine asynchrone dont l'alimentation est imposée, la machine fonctionnant directement sur le réseau d'électricité domestique. Nous nous intéressons ici à un modèle de machine dont l'amplitude et la fréquence de la tension d'alimentation peuvent être soumises à une optimisation. Nous choisissons comme paramètres d'alimentation $(v_s ; f_s)$. Ce choix est arbitraire : il aurait par exemple pu se porter sur $(i_s ; f_r)$.

Notons que ceci sous-entend une machine connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur statique. La prise en compte du convertisseur statique nécessite une redéfinition significative de la fonction de conception, incluant par exemple les caractéristiques des interrupteurs, les pertes de fonctionnement supplémentaires, les coûts environnementaux, etc. Notamment par manque de données concernant les impacts environnementaux,

le convertisseur statique n'est pas considéré dans ces travaux, seuls les paramètres d'alimentation, dont il rend possible le réglage, sont pris en compte.

Nous constatons dans l'expression (5.5b) qu'il est possible d'écrire la tension par spire d'alimentation sous la forme d'une fonction de la pulsation statorique, du couple de consigne C^* et de la vitesse de consigne Ω^* à un instant donné, sachant que C^* et Ω^* peuvent évoluer temporellement sous forme de profils. Il est possible d'écrire une relation similaire sur le courant statorique.

$$v_s = \sqrt{\frac{\omega_s - p\Omega^*}{3r_r p} C^* \left| \frac{z_s z_m + z_s z_r + z_m z_r}{z_m} \right|} = \Lambda(\omega_s, C^*, \Omega^*) \quad (5.12)$$

Il est ainsi possible d'exprimer sous forme analytique les pertes de fonctionnement pour un point $(C^*; \Omega^*)$ et le niveau maximal d'induction dans le circuit magnétique à partir de cette relation, c'est-à-dire comme fonction de la pulsation statorique et des données de consigne. D'après les expressions (5.9) et (5.10) nous avons :

$$P_{fct}(v_s, \omega_s, C^*, \Omega^*) = P_{fct}(\Lambda(\omega_s, C^*, \Omega^*), \omega_s, C^*, \Omega^*) = \frac{3\Lambda^2(\omega_s, C^*, \Omega^*)}{|z_s z_m + z_s z_r + z_m z_r|^2} \left[r_s |z_r + z_m|^2 + r_r |z_m|^2 + \frac{1}{r_f} |z_r z_m|^2 \right] \quad (5.13)$$

Le niveau d'induction maximal dans la machine \hat{B} est calculé de façon à séparer les paramètres d'alimentation électriques des paramètres géométriques. Cette distinction, faisant apparaître une quantité ς homogène à l'inverse d'une surface, est un passage nécessaire dans la mise en place de l'algorithme de calcul car les processus d'optimisation de l'alimentation et de la géométrie sont distincts. Ainsi nous définissons la grandeur ς telle que :

$$\varsigma = \frac{\hat{B}}{(e_s/\omega_s)} \text{ avec } \hat{B} = \max \{ \hat{B}_{cs}; \hat{B}_{cr}; \hat{B}_{ds}; \hat{B}_{dr} \} \quad (5.14a)$$

ce qui nous donne le niveau d'induction maximal dans la machine :

$$\hat{B}(v_s, \omega_s, C^*, \Omega^*) = \Lambda(\omega_s, C^*, \Omega^*) \left| \frac{z_r z_m}{z_s z_m + z_s z_r + z_m z_r} \right| \frac{\varsigma}{\omega_s} \quad (5.14b)$$

Pour chaque géométrie testée par l'algorithme évolutionnaire, l'alimentation est optimisée sur un cycle de fonctionnement donné. Dans l'hypothèse où ce cycle de fonctionnement est discrétisé en une succession de valeurs de couple et de vitesse, les expressions (5.13) et (5.14b) doivent être calculées pour chaque point de fonctionnement du

cycle. Il faut dès lors optimiser l'alimentation « localement » (pour chaque point du cycle) par rapport à l'optimisation de l'algorithme évolutionnaire, qui se borne à proposer des géométries. L'algorithme interne est mono-objectif sous contrainte d'un niveau maximal d'induction dans le circuit magnétique de la machine \hat{B}^* :

$$\min \{P_{fct}(v_s, \omega_s, C^*, \Omega^*)\} \text{ tel que } \hat{B}(v_s, \omega_s, C^*, \Omega^*) \leq \hat{B}^* \quad (5.15)$$

L'algorithme évolutionnaire ne gère ainsi que la contrainte de température du bobinage. Le principe du choix des paramètres d'alimentation qui minimisent les pertes de fonctionnement est présenté à la Figure 5.7. La contrainte d'induction n'y est pas représentée. Le synoptique d'optimisation est proposé à la Figure 5.8.

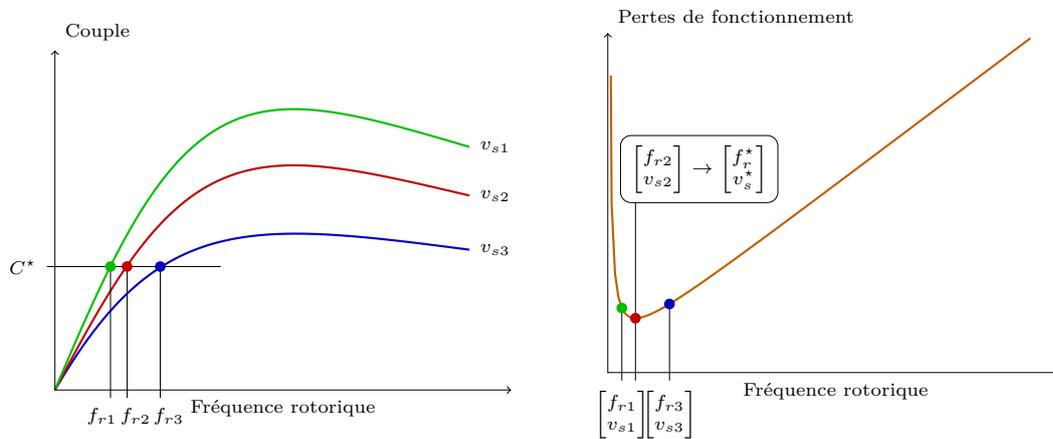


Figure 5.7 – *Choix des paramètres d'alimentation minimisant les pertes de fonctionnement.*

Le temps de calcul des optimisations dans le cas de cycles de fonctionnement définis par plusieurs points est directement lié au nombre de points de fonctionnement. Notons que ce temps de calcul est déjà significatif sur ce cas de machine relativement simple (plusieurs heures par points de fonctionnements définis sur un cycle journalier). Nous ne proposons pas de résultats basés sur ce type d'optimisation dans la suite de ce chapitre. En effet, les temps de calculs sont réhhibitoires devant l'intérêt méthodologique apporté par la considération de plusieurs points de fonctionnement dans l'optimisation de l'alimentation. Des considérations probabilistes pourraient être utilisées sur ce type de problème mais n'ont pas été considérées ici.

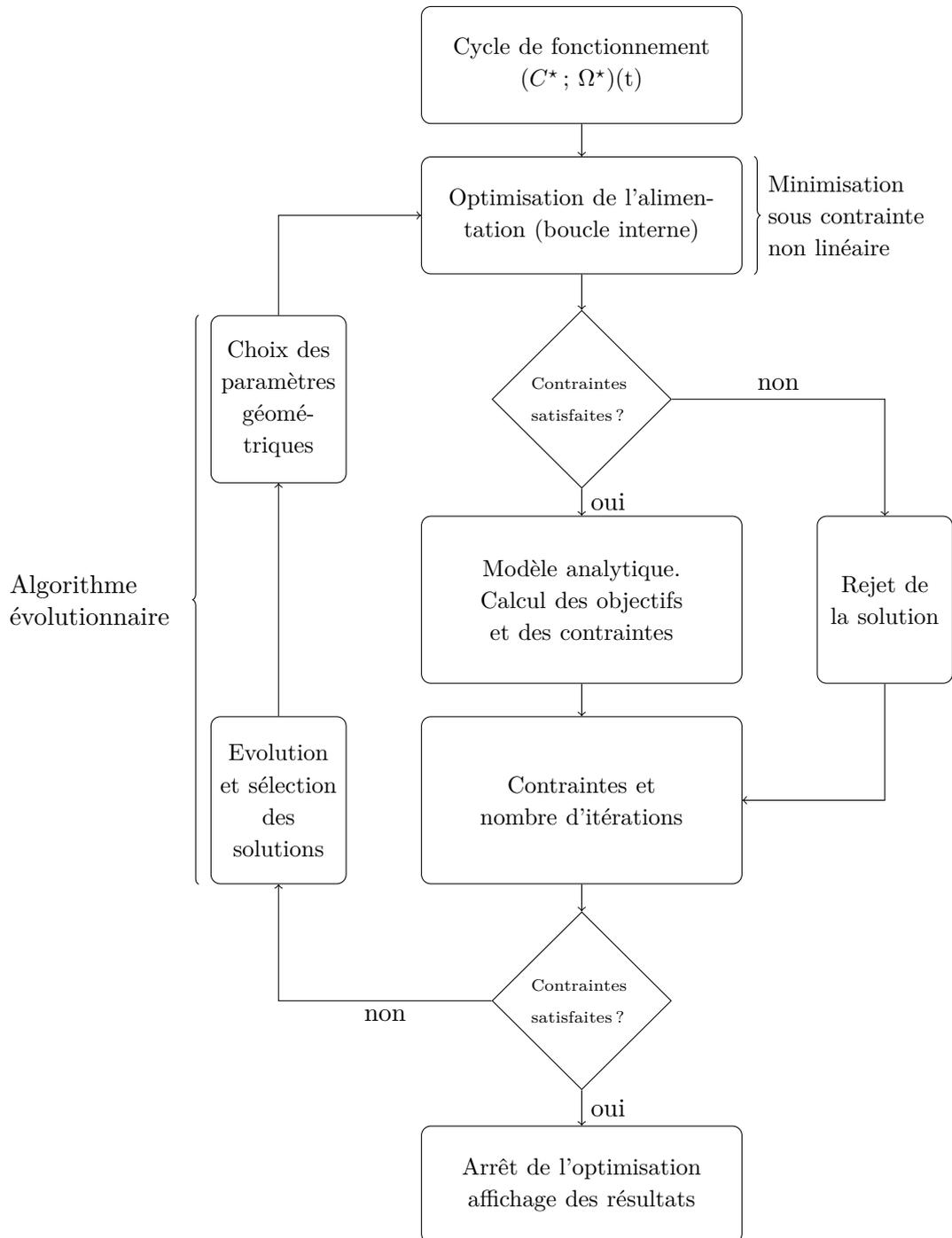


Figure 5.8 – Synoptique d'optimisation de la machine asynchrone triphasée pour un cycle de fonctionnement défini par plusieurs points de fonctionnement.

2.3.2 Cas d'un seul point de fonctionnement

Dans ce cas de figure, nous cherchons à obtenir la tension et la fréquence optimale pour un seul point de fonctionnement défini par un couple et une vitesse de rotation donnés. De ce fait, il est possible de « remonter » l'optimisation des paramètres d'alimentation au niveau de l'optimisation des paramètres géométriques. Sans optimisation interne de l'alimentation, l'algorithme évolutionnaire gère tous les paramètres et toutes les contraintes. Dans ce cas-ci, le synoptique d'optimisation est identique à celui proposé pour le transformateur, présenté au Chapitre 2, Figure 3.6 page 83. Il est dès lors possible d'optimiser l'alimentation sur critère d'énergie globale sur cycle de vie comme sur la seule phase de fonctionnement. Les résultats d'optimisation proposés dans la suite de ce chapitre sont basés sur ce principe d'optimisation de l'alimentation.

Sans changements du point de vue méthodologique, l'optimisation de l'alimentation sur un seul point de fonctionnement permet un gain significatif de temps de calcul par rapport à une optimisation portant sur un cycle de fonctionnement défini par plusieurs points. En effet, une optimisation sur 500 générations de 1000 individus nécessite, dans notre cas, environ deux heures de temps de calcul avec un seul point de fonctionnement et cinq avec seulement deux points de fonctionnement.

3. Optimisation des dimensions de la machine

L'analyse des résultats d'optimisation est divisée en trois parties. La première partie propose l'évolution des paramètres géométriques et électriques de la machine dans un cas d'optimisation donné. La deuxième partie justifie le comportement des résultats d'optimisation vis-à-vis du nombre de paires de pôles de la machine asynchrone. Enfin la dernière partie traite de la sensibilité des résultats d'optimisation à quatre variables clefs : le niveau de puissance de la machine, permettant ainsi une première étude des effets d'échelles, la durée d'utilisation, le conditionnement de la machine à travers une action sur son refroidissement et enfin une première prise en compte de la masse des parties inactives dans le calcul de l'énergie globale sur cycle de vie.

3.1 Résultats d'optimisation

Nous présentons dans ce paragraphe la variation des grandeurs caractéristiques du problème d'optimisation dans le plan des objectifs. Pour ces simulations nous choisissons un cycle de fonctionnement défini par un couple de 10 N.m à une vitesse de 1400 tours par minute sur une durée d'utilisation de cinq heures par jour, répété chaque jour pendant dix ans. Nous présentons les résultats d'optimisation obtenus ainsi que les structures extrêmes

à la Figure 5.9. Notons que l'ensemble des solutions retenues ne présentent qu'une seule paire de pôles. Nous revenons sur ce point à la section §3.2, page 169.

Structure	Structure exemple de compromis masse-énergie	Structure minimisant E_{acv}
minimisant la masse 4,3.10 ⁴ kWh ; 50 kg	2,3.10 ⁴ kWh ; 130 kg	1,7.10 ⁴ kWh ; 470 kg

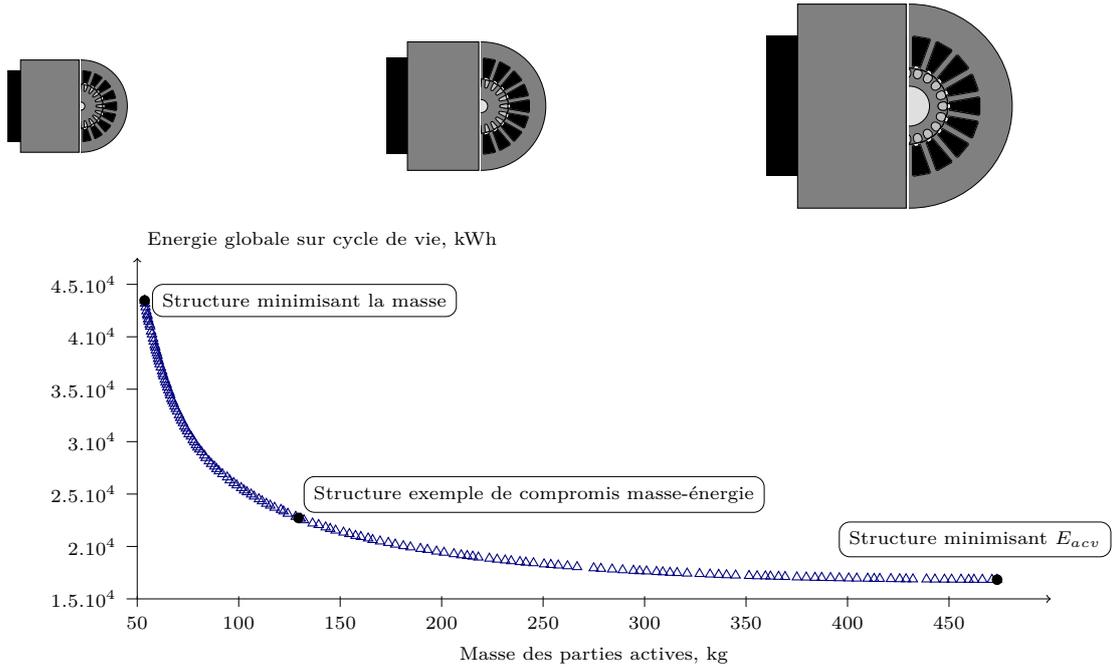


Figure 5.9 – Front de solutions Pareto-optimales et structures de machines associées aux solutions extrêmes. Optimisation lancée sur 500 générations de 1000 individus, $p = 1$. $C^* = 10 \text{ N.m}$; $\Omega^* = 1400 \text{ tr/min}$. Régime permanent thermique 5 h par jour pendant 10 ans.

3.1.1 Grandeurs géométriques

Les dimensions significatives de la machine sont présentées à la Figure 5.10. Ces dimensions évoluent continuellement avec les objectifs, sauf en ce qui concerne les hauteurs de culasse et d'encoche rotoriques.

Soulignons que les paramètres géométriques n'atteignent pas les butées regroupées dans la Table 5.3, page 159. En effet, les solutions de faible masse sont en butée de contrainte thermique et les solutions de forte masse atteignent le minimum d'énergie globale sur cycle de vie : les solutions de masse supérieure sont dominées et rejetées par l'algorithme.

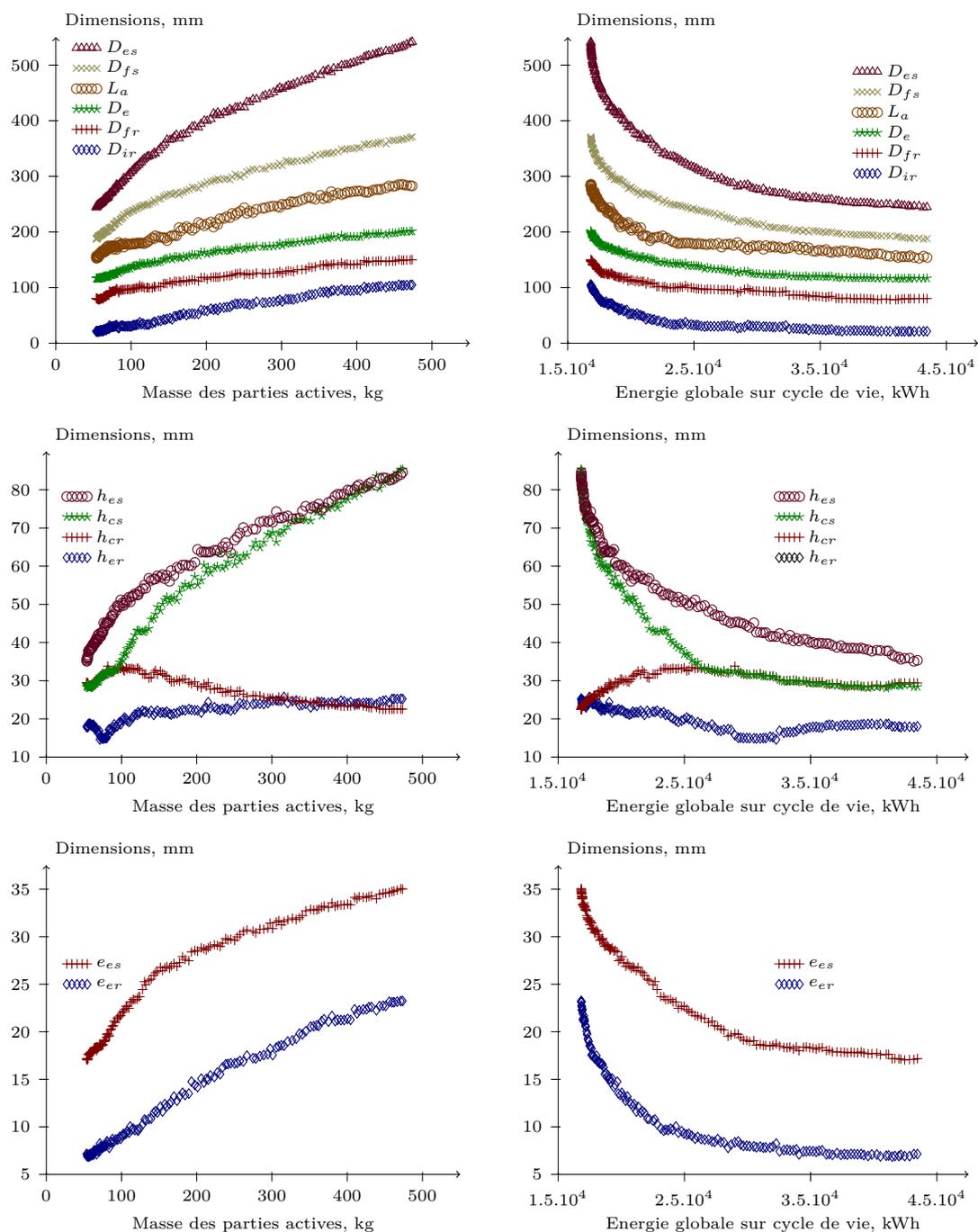


Figure 5.10 – Variation des paramètres géométriques « optimaux ». Optimisation lancée sur 500 générations de 1000 individus. $C^* = 10 \text{ N.m}$; $\Omega^* = 1400 \text{ tr/min}$. Régime permanent thermique 5 h par jour pendant 10 ans.

3.1.2 Grandeurs électriques

Les grandeurs électriques sont présentées à la Figure 5.11. Rappelons que l'alimentation est optimisée en même temps que les grandeurs géométriques. Nous observons qu'une légère augmentation de la fréquence statorique (pour les solutions de faible masse) se traduit par un accroissement significatif des ampères.tours absorbés par la machine ainsi qu'une diminution plus faible de la tension par spire. En effet, la puissance apparente augmente aussi avec la fréquence statorique. L'accroissement de la puissance apparente pour les solutions de faible masse aurait eut un effet amplifié si le dimensionnement du convertisseur statique (notamment ses impacts environnementaux) avait été pris en compte dans les optimisations.

Nous proposons à la Figure 5.12 les pertes de fonctionnement, la température atteinte en régime permanent thermique par le bobinage et le niveau d'induction maximal dans la machine. Comme dans le cas des optimisations sur le transformateur monophasé (se référer au Chapitre 3, Figure 3.10 page 88) la contrainte de température est atteinte pour les solutions de plus faible masse. Par contre, le choix d'une alimentation optimisée conduit l'algorithme génétique à placer toutes les solutions en butée d'induction, ce qui n'était pas le cas pour le transformateur, dont l'alimentation était fixe. Cette butée d'induction n'a d'autre intérêt que de limiter la validité de la modélisation sans prise en compte de la saturation. Ainsi cette limitation disparaîtrait avec une modélisation en non linéaire mais la valeur maximale de l'induction atteindrait d'autres limites liées à l'accroissement du courant magnétisant et des pertes associées.

Comme le niveau d'induction est quasiment identique pour toutes les solutions, les pertes fer ne dépendent plus que de la fréquence d'alimentation et des variations de la géométrie de la machine. Le décrochement qui apparaît sur les solutions de faible masse provient ainsi du changement de pente de la hauteur de culasse rotorique, comme nous pouvons le constater à la Figure 5.10. Nous retrouvons de plus une égalité entre pertes Joule statorique et pertes fer sur les solutions de forte masse, mais qui n'est pas générale sur l'ensemble du front de Pareto.

La faible proportion des pertes Joule rotorique devant les pertes Joule statorique s'explique partiellement par le fait que l'algorithme évolutionnaire soit bloqué au niveau des hauteurs de culasse de de dents rotoriques par la contrainte sur le niveau d'induction magnétique, comme nous pouvons le constater à la Figure 5.10 (pour les hauteurs de culasse et de dents rotoriques) et la Figure 5.12 (pour le niveau d'induction magnétique maximal). Ainsi, la diminution de la masse des solutions entraîne bien une diminution beaucoup plus marquée des grandeurs statoriques (diamètres et hauteurs) que des grandeurs rotoriques, expliquant la différence d'augmentation entre les deux niveaux de pertes Joule.

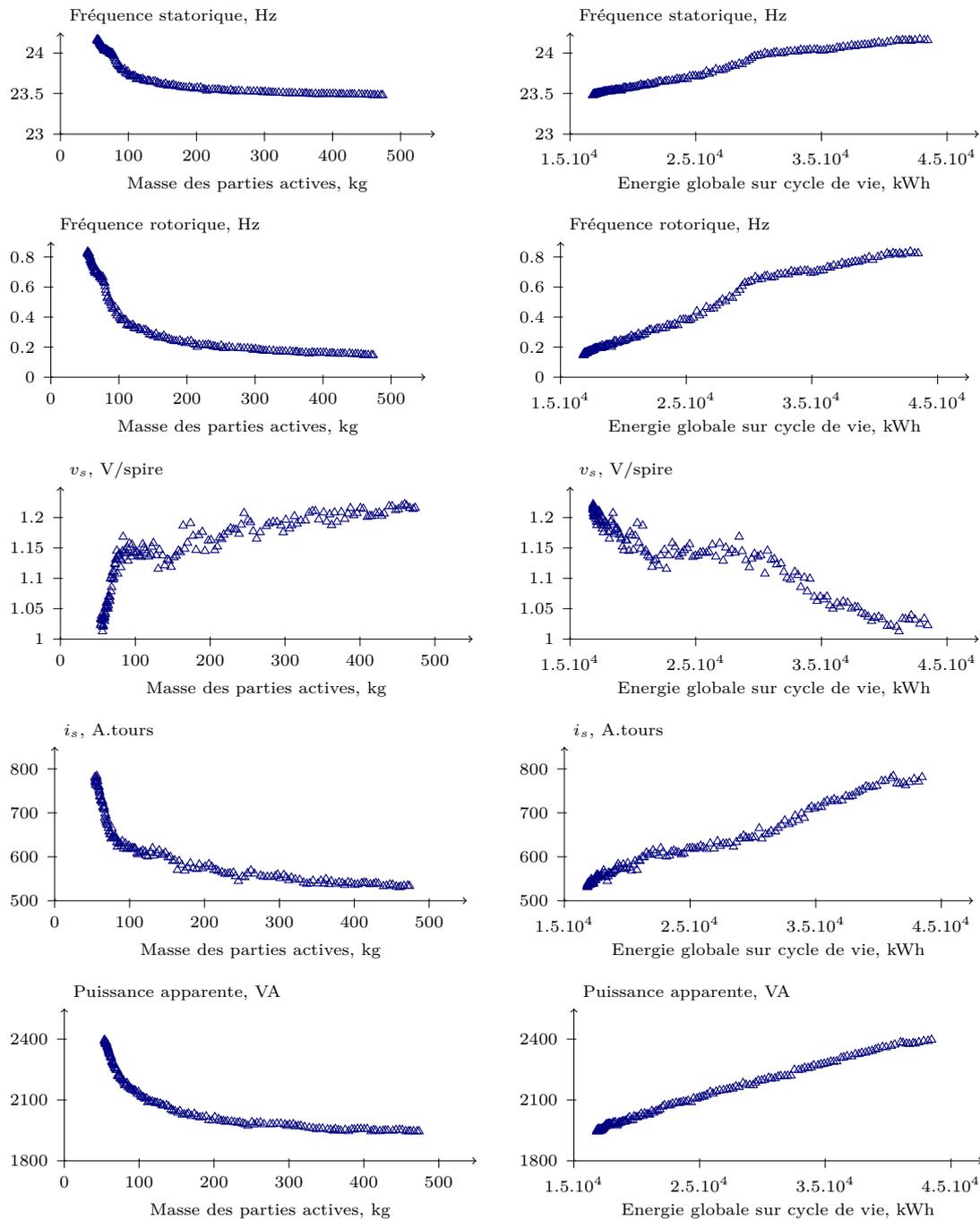


Figure 5.11 – Variation des grandeurs électriques pour une machine à une paire de pôles. Optimisation lancée sur 500 générations de 1000 individus. $C^* = 10 \text{ N.m}$; $\Omega^* = 1400 \text{ tr/min}$. Régime permanent thermique 5 h par jour pendant 10 ans.

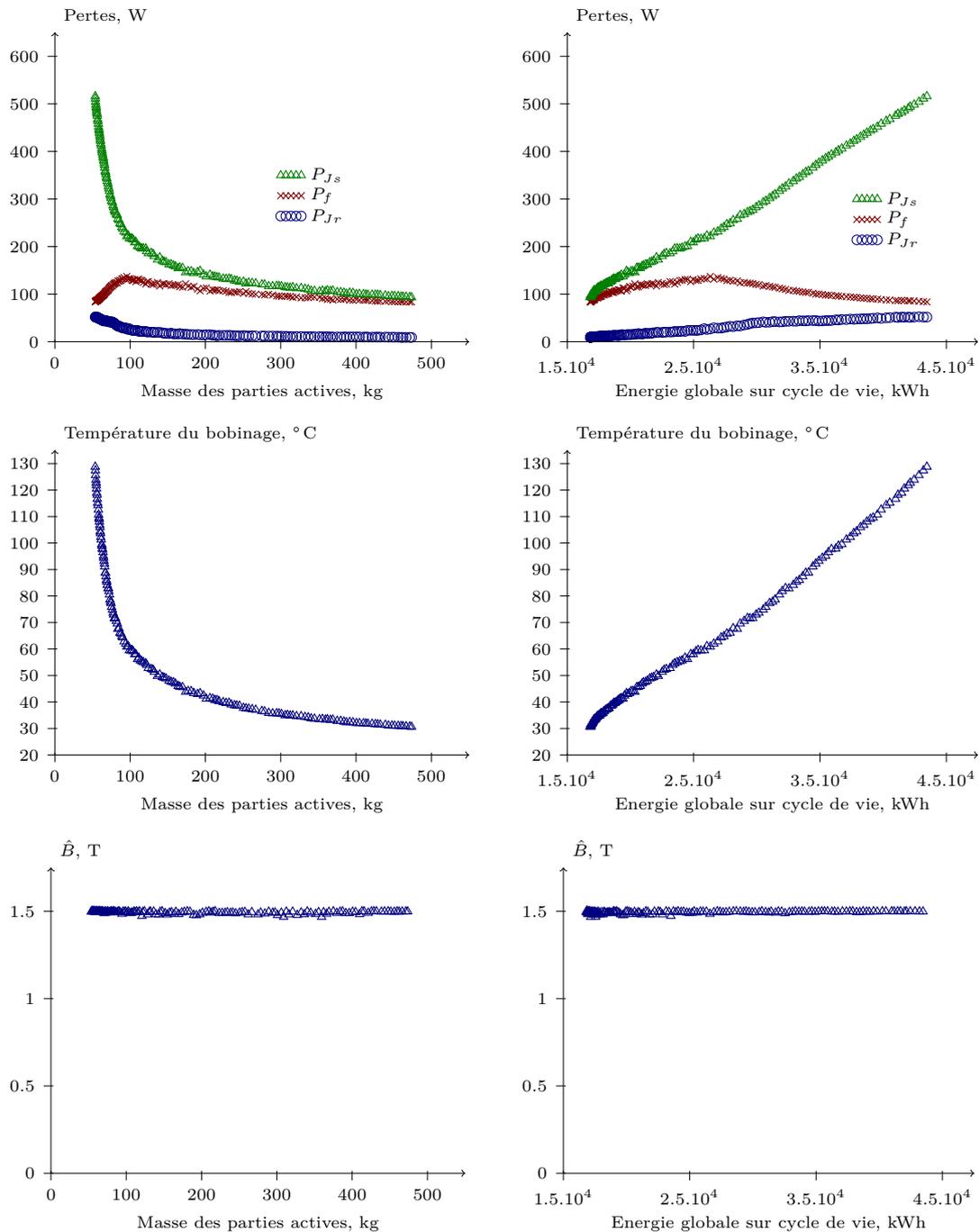


Figure 5.12 – Pertes de fonctionnement et contraintes pour une machine à une paire de pôles. Optimisation lancée sur 500 générations de 1000 individus. $C^* = 10 \text{ N.m}$; $\Omega^* = 1400 \text{ tr/min}$. Régime permanent thermique 5 h par jour pendant 10 ans.

3.1.3 Optimisation sur phase de fonctionnement

Nous proposons ainsi à la Figure 5.13 la comparaison des fronts de Pareto pour une minimisation de l'énergie sur cycle de vie et sur la seule phase de fonctionnement. Nous visualisons sur cette figure l'intérêt d'une approche d'éco-conception par rapport à une approche classique. En effet, une parties de solutions de forte masse proposées par la minimisation de E_{fct} sont rejetées lors de l'optimisation minimisant E_{fct} . Les solutions trop coûteuses à l'environnement en termes d'énergie et de masse sont ainsi rejetées.

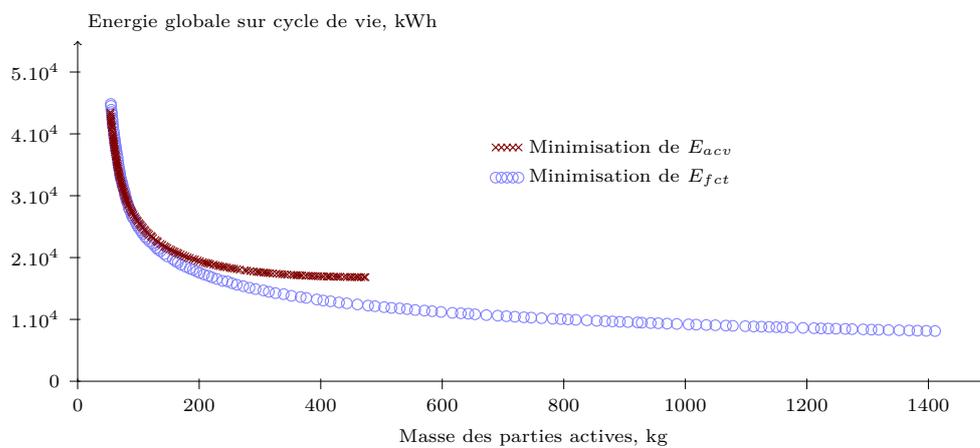


Figure 5.13 – *Front de solutions Pareto-optimales pour une minimisation de l'énergie sur cycle de vie (sombre) et de la seule phase de fonctionnement (claire). Optimisation lancée sur 500 générations de 1000 individus. $C^* = 10 \text{ N.m}$; $\Omega^* = 1400 \text{ tr/min}$. Régime permanent thermique 5 h par jour pendant 10 ans.*

Nous retrouvons sur cette figure les différences entre optimisation sur cycle de vie et optimisation sur cycle de fonctionnement déjà rencontrées dans les deux chapitres précédents au Chapitre 3 à la section §3.1.1 page 90 et au Chapitre 4 à la section §3.1.2 page 130. Du côté des solutions de forte masse, l'optimisation de E_{fct} ne permet pas d'atteindre de minimum d'énergie (les paramètres géométriques atteignent leur butée). Du côté des solutions de faible masse, les deux optimisations se rejoignent du fait que les pertes de fonctionnement prennent le pas devant les autres contributions à l'énergie globale sur cycle de vie.

3.2 Action sur le nombre de paires de pôles

Dans les conditions d'alimentation sélectionnées, la paramétrisation du nombre de paires de pôles apporte des résultats spécifiques. En effet, les configurations de machine présentant un grand nombre de paires de pôles ne sont pas optimales. Afin d'expliquer

cette propriété, nous proposons une étude de sensibilité des grandeurs caractéristiques du problème au nombre de paires de pôles dans les conditions d'alimentation optimisée telles que présentées à la section §2.3, page 159.

La masse des parties actives varie peu avec le nombre de paires de pôles. Ainsi l'action de la variation du nombre de paires de pôles sur les pertes de fonctionnement conditionne entièrement le choix ou non d'une structure à grand nombre de paires de pôles lors des optimisations. Afin de tracer les tendances des pertes de fonctionnement, nous sélectionnons une géométrie de machine (non optimale selon nos critères de conception) en fixant les paramètres géométriques proposés dans la Table 5.3, page 159. Ainsi, les proportions encoche-dent, les hauteurs de culasse et d'encoche restent constantes pour toutes les machines dans cette section : hormis le nombre de paires de pôles, tous les paramètres géométriques sont fixes. Nous proposons à la Figure 5.14 le tracé de ces machines pour p variant de un à trois.

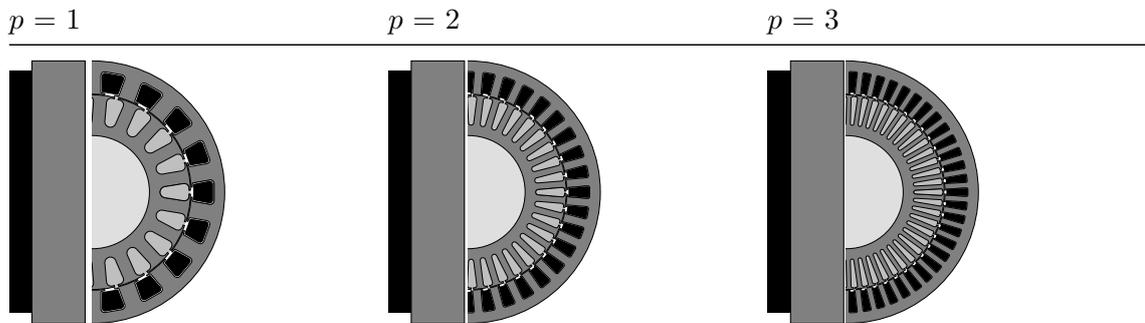


Figure 5.14 – *Tracé des machines utilisées pour l'étude de sensibilité des grandeurs caractéristiques du problème au nombre de paires de pôles, pour p variant de 1 à 3.*

3.2.1 Éléments du schéma équivalent monophasé

Afin d'analyser la modification des performances de la machine lorsque p varie, nous exprimons tout d'abord la sensibilité des éléments du schéma équivalent monophasé de la Figure 5.2 page 150 au nombre de paires de pôles. Rappelons que leur calcul est reporté en Annexe F page 241 et qu'il s'agit de composants ramenés à une spire (perméances et résistances spécifiques).

Rappelons aussi que dans cette analyse tous les paramètres sont maintenus constants sauf le nombre de paires de pôles de la machine. Selon sa définition, le coefficient de bobinage ne varie pas avec p (se référer à la section §2.1 en Annexe F, page 245) donc le rapport de transformation non plus.

Nous écrivons ainsi les tendances variationnelles des éléments du schéma électrique équivalent en fonction du nombre de paires de pôles comme suit :

$$r_s \propto \frac{N_s}{S_{es}} \propto p^2 \text{ avec } N_s \propto p \text{ et } S_{es} \propto p^{-1} \quad (5.16a)$$

$$\mathcal{P}_s \propto N_s \frac{h_{es}}{e_{es}} \propto p^2 \text{ avec } e_{es} \propto p^{-1} \quad (5.16b)$$

$$\mathcal{P}_\mu \propto p^{-2} \quad (5.16c)$$

$$r_r \propto \frac{1}{N_r S_{er}} \propto p^0 \text{ avec } N_r \propto p \text{ et } S_{er} \propto p^{-1} \quad (5.16d)$$

$$\mathcal{P}_r \propto \frac{h_{er}}{N_r e_{er}} \propto p^0 \text{ avec } e_{er} \propto p^{-1} \quad (5.16e)$$

Les grandeurs statoriques augmentent avec le nombre de paires de pôles, contrairement à la perméance magnétisante qui va diminuer avec p et aux grandeurs rotoriques, qui sont indépendantes du nombre de paires de pôles.

3.2.2 Grandeurs électriques

En plus de la variation des éléments du schéma équivalent monophasé en fonction de p , celle des grandeurs électriques va nous donner l'action de p sur les pertes de fonctionnement. Comme présenté à la section §2.3 page 159, nous optimisons la tension et la fréquence statorique afin de minimiser les pertes sur cycle de fonctionnement ou sur cycle de vie. Avec un seul point de fonctionnement, nous traitons l'alimentation d'une machine qui fournit toujours le même couple et la même vitesse.

La masse variant peu avec le nombre de paires de pôles à géométrie constante, minimiser E_{acv} ou les pertes de fonctionnement est équivalent dans ce cas. Nous proposons à la Figure 5.15 l'évolution des pertes et du niveau maximal d'induction dans le cas de la machine à deux paires de pôles présentée à la Figure 5.14 en fonction de la fréquence d'alimentation. Rappelons que nous calculons la tension v_s (non présentée ici) d'après l'équation (5.12) pour chaque pas de fréquence proposé sur cette figure afin de satisfaire au point de fonctionnement (C^* ; Ω^*). Nous constatons que le choix d'une alimentation qui minimise les pertes de fonctionnement implique un fonctionnement à un glissement très faible.

Dans cette hypothèse, l'expression du couple en fonction du glissement peut être linéarisée et s'écrit en fonction de la tension aux bornes de la perméance magnétisante. Nous présentons à la Figure 5.16 le positionnement des courbes couple-vitesse en fonction du nombre de paires de pôle autour du point de consigne (C^* ; Ω^*).

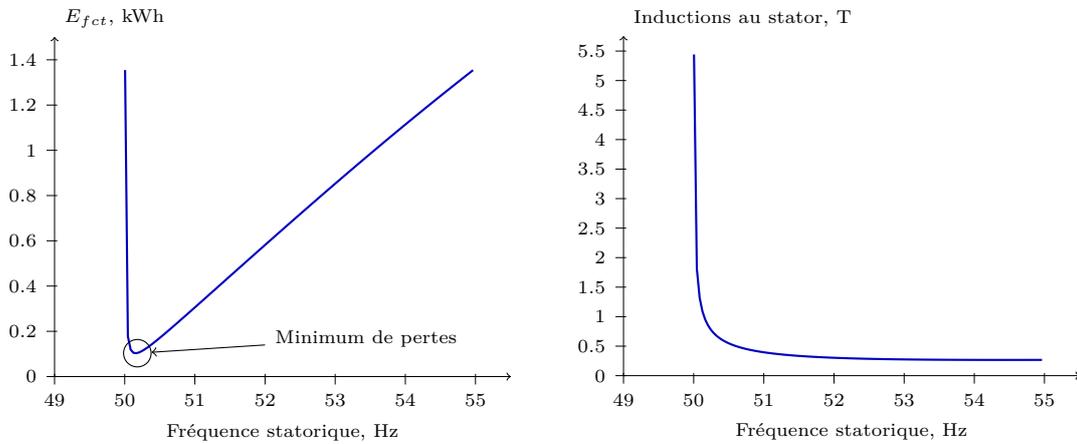


Figure 5.15 – *Energie des pertes de fonctionnement et niveau maximal d'induction dans la machine présentée à la Figure 5.14 pour $p = 2$ en fonction de la pulsation statorique pour $C^* = 10 \text{ N.m}$ et $\Omega^* = 1400 \text{ trs/min}$.*

$$C^* \sim \frac{3p^2}{r_r} \left| \frac{e_s}{\omega_s} \right|^2 (\Omega_s - \Omega^*) \quad (5.17)$$

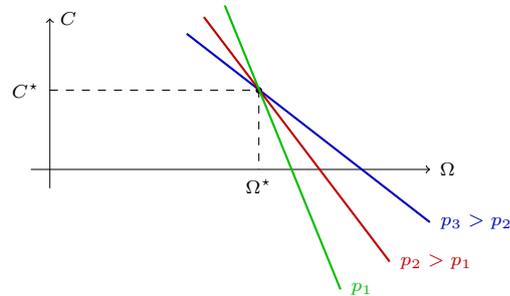


Figure 5.16 – *Position des courbes couple-vitesse autour du point de consigne $(C^* ; \Omega^*)$ en fonction du nombre de paires de pôles. L'alimentation $(v_s ; f_s)$ est optimisée pour minimiser les pertes de fonctionnement.*

Toujours d'après le schéma électrique présenté à la Figure 5.2 page 150, nous estimons la variation des grandeurs électriques en fonction du nombre de paires de pôles.

La différence $(\Omega_s - \Omega^*)$, tout comme r_r , varie peu avec p . Nous négligeons cette variation devant celle des autres grandeurs mises en jeu. Sachant que $\omega_s \propto p$ et que nous travaillons à couple imposé $C = C^*$, nous obtenons pour le tension par spire aux bornes de la perméance magnétisante $e_s \propto p^0$. Sachant que $P_\mu \propto p^{-2}$, $e_s \propto p^0$ permet d'écrire $i_\mu \propto p$. Les éléments rotoriques ramenés au stator, le couple et le glissement étant indépendants de p , le courant

i_r ne varie pas avec le nombre de paires de pôles : $i_r \propto p^0$. Les considérations sur i_r et i_μ nous permettent d'écrire $i_s \propto p$.

Pertes fer - Le flux embrassé par un pôle $\varphi = e_s/\omega_s$ diminue avec le nombre de paires de pôles. Ceci entraîne une diminution de l'induction dans les culasses (les hauteurs de culasse restent constantes dans ces comparaisons) et aucune variation du niveau d'induction dans les dents (l'épaisseur des dents diminuent lorsque p augmente car la proportion dent-encoche est conservée). Les pertes fer diminuent donc avec p dans un premier temps ($\hat{B}_{cs} \propto p^{-1}$) jusqu'à ce que le terme des pertes par courants de Foucault (proportionnel à ω_s^2) prenne l'ascendant sur le terme des pertes par hystérésis. Les pertes fer ne dépendent alors plus de p .

Pertes Joule rotorique - Celles-ci ne dépendent pas de p , r_r et i_r ne variant pas avec p au premier ordre.

Pertes Joule statorique - Nous avons montré que $r_s \propto p^2$ et $i_s \propto p$. Les pertes Joule statoriques deviennent donc très importantes (prépondérantes devant les autres pertes de fonctionnement) avec l'augmentation du nombre de paires de pôles.

Nous proposons à la Figure 5.17 l'évolution de ces grandeurs en fonction du nombre de paires de pôles dans le cas des machines présentées à la Figure 5.14 pour un nombre de paires de pôles variant de un à sept. Notons que le comportement de l'induction est validé par éléments finis (non représenté ici). Les courbes de tendances corroborent les relations de proportionnalités énoncées ci-dessus au premier ordre. Un résumé des tendances est proposé dans la Table 5.4.

Table 5.4 – Résumé des variations des grandeurs caractéristiques du problème en fonction du nombre de paires de pôles.

Grandeur	relation au nombre de paires de pôles
P_{Js}	p^3
r_s, \mathcal{P}_s	p^2
$\omega_s, e_s, i_\mu, i_r, i_s, P_{Jr}$	p
$r_r, \mathcal{P}_r, P_{fer}, \hat{B}_{cs}$	p^{-1}
\mathcal{P}_μ	p^{-2}

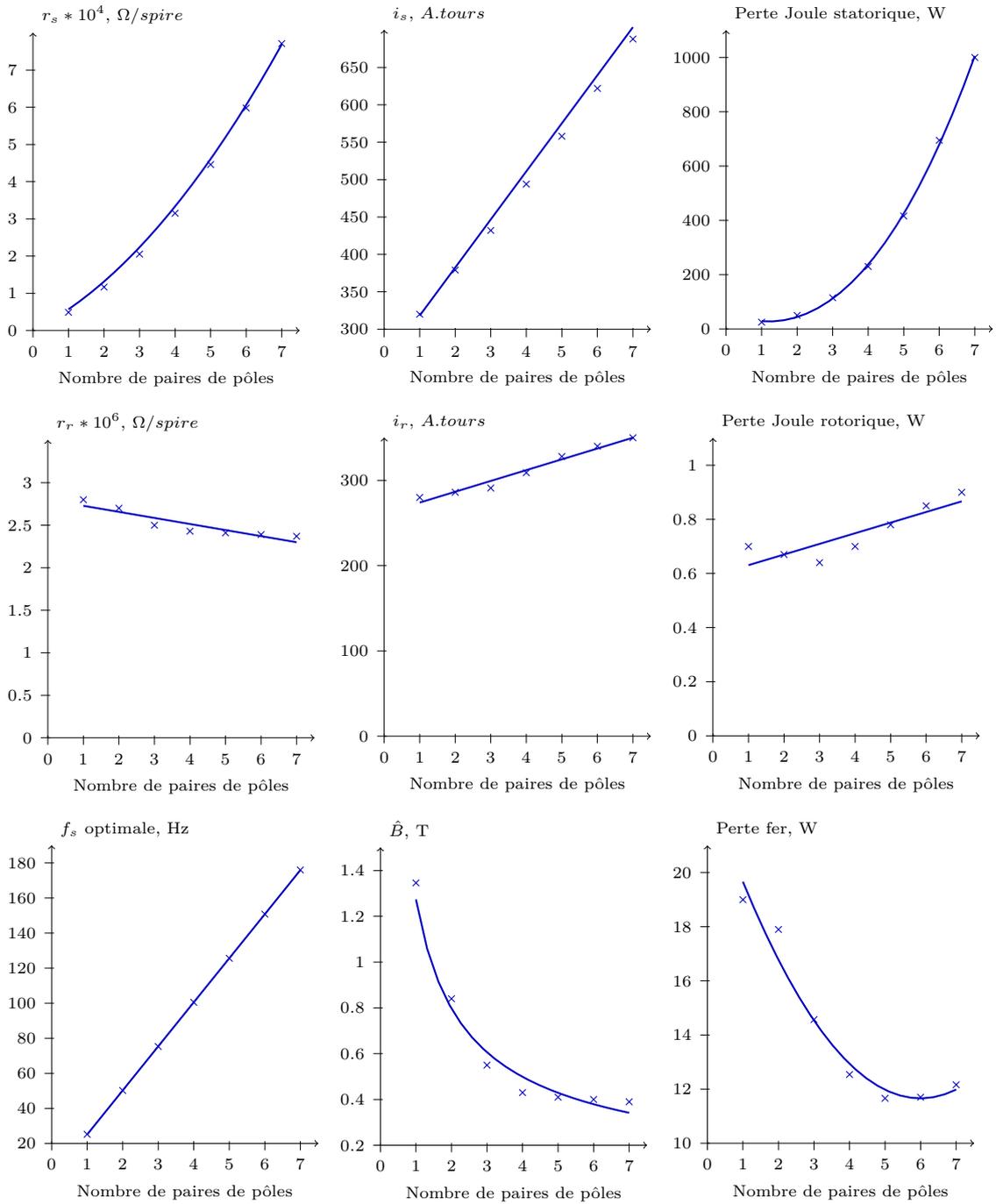


Figure 5.17 – Variation des grandeurs caractéristiques du problème en fonction du nombre de paires de pôles et courbes de tendances théoriques (se référer à la Table 5.4) tout égal par ailleurs, pour $C^* = 10 N.m$ et $\Omega^* = 1400 trs/min$.

3.2.3 Résultats d'optimisation

L'augmentation du nombre de paires de pôles permet de diminuer les hauteurs de culasses du fait de la diminution des pertes fer, mais ce gain de masse est accompagné d'une augmentation significative des échauffements dus aux pertes Joule statoriques en faveur d'une augmentation de la masse. Le rapport des deux types de pertes montre que l'augmentation des pertes Joule statoriques est prépondérante devant la diminution des pertes fer, empêchant l'algorithme évolutionnaire d'augmenter le nombre de paires de pôles pour diminuer la masse. De ce fait, l'algorithme aura tendance à augmenter le nombre de paires de pôles avec l'augmentation de la masse de la machine, comportement que nous retrouvons dans nos simulations.

Nous présentons à la Figure 5.18 les fronts de solutions Pareto-optimales obtenus pour un nombre de paires de pôles variant de un à trois, dans les conditions d'optimisation utilisées à la section §3.1, page 163. Nous observons que les solutions de machines présentant deux et trois paires de pôles sont dominées par celles à une seule paire de pôles.

La présentation des fronts de solutions à la Figure 5.18 distincts suivant le nombre de paires de pôles souligne un problème « technique » que nous avons rencontrés lors des simulations. En effet, il se trouve que les algorithmes évolutionnaires utilisés dans les optimisations (le NSGA II [Deb01] et le MOPSO, développé en interne par Judicael Aubry) ont certaines difficultés à proposer les solutions optimales lorsque p est un paramètre libre. Dans nos simulations, celui-ci est entier et de faible valeur. Ainsi une variation unitaire du nombre de paires de pôles a une action importante sur la disposition des solutions, « déstabilisant » significativement les algorithmes évolutionnaires dans leur choix de paramètres à chaque nouvelle génération de calcul. De fait, ils ne donnent pas deux fois le même résultat lorsque nous lançons deux fois la même procédure d'optimisation. Pour contourner ce problème nous lançons plusieurs optimisations à p fixé, puis extrayons le front de solutions Pareto-optimales de l'assemblage des optimisations.

Nous vérifions de plus qu'en éliminant artificiellement les pertes Joule statoriques dans le modèle analytique (en annulant la résistivité mais toujours avec l'alimentation optimisée), les résultats d'optimisation lancés dans les mêmes conditions que ceux présentés à la Figure 5.18 donnent des résultats différents en terme de choix du nombre de paires de pôles (non présentés ici). En effet, sans l'augmentation des pertes Joule statorique, il est intéressant, pour diminuer la masse, d'augmenter le nombre de paires de pôles. Dès lors l'algorithme évolutionnaire nous propose bien des machines avec un plus grand nombre de paires de pôles (il existe un optimum), les solutions de machines à une paire de pôles étant cette fois-ci dominées selon le critère des fronts de Pareto.

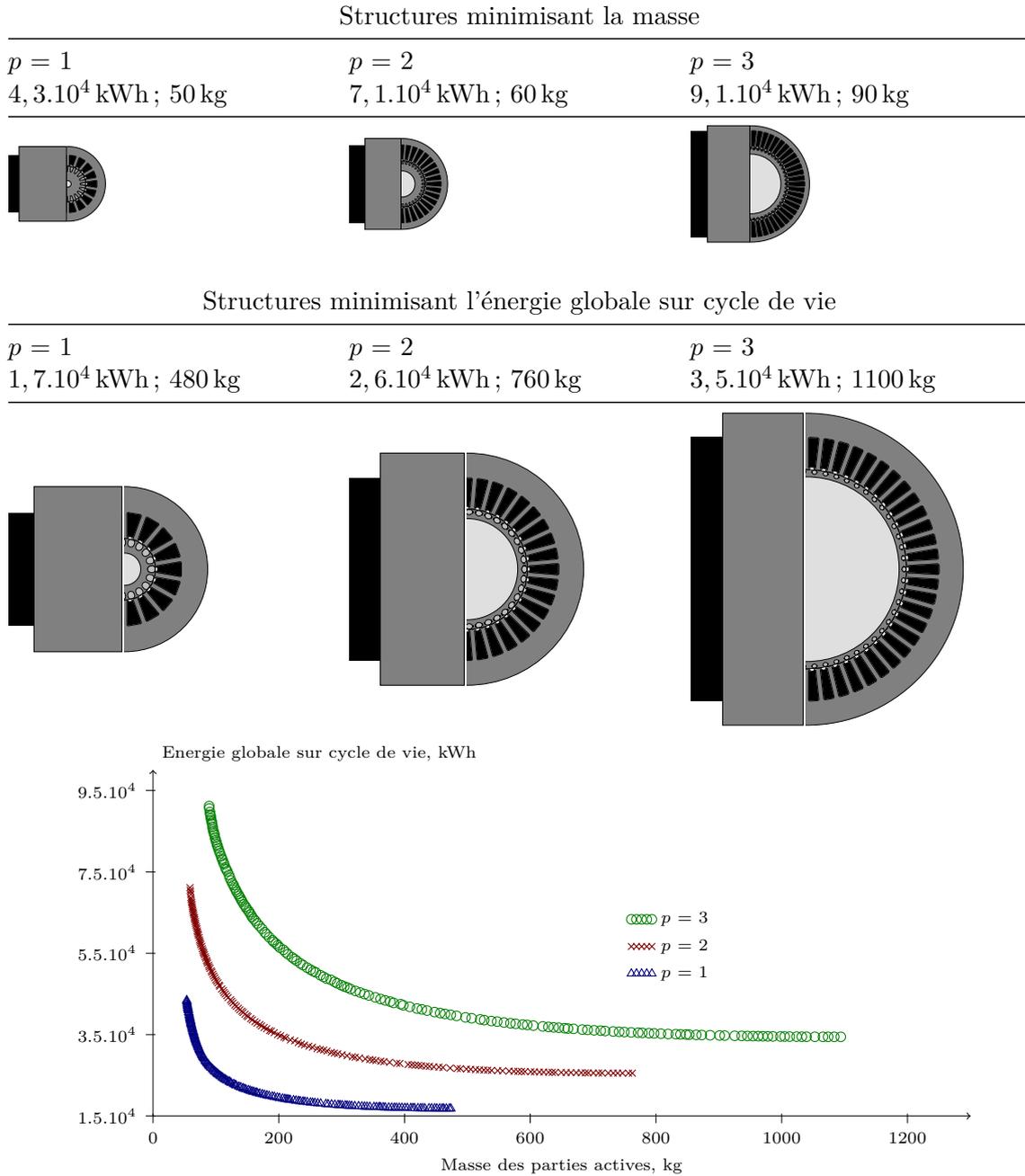


Figure 5.18 – Front de solutions Pareto-optimales et structures de machines associées aux solutions extrêmes pour le nombre de paires de pôle variant de un à trois. Optimisation lancée sur 500 générations de 1000 individus. $C^* = 10$ N.m ; $\Omega^* = 1400$ tr/min. Régime permanent thermique 5 h par jour pendant 10 ans.

3.3 Analyses de sensibilité des résultats d'optimisation

3.3.1 Niveau de puissance

Un point non traité dans les chapitres précédents est la variation du niveau de puissance du modèle simulé. Notons qu'il s'agit ici de la puissance nominale de la machine et non pas d'une puissance maximale sur cycle, le cycle de fonctionnement simulé étant simplifié à un seul point. Ce type de sensibilité nous permet une première estimation des effets d'échelles rencontrés lors d'optimisations sur cycle de vie.

Présenté au chapitre précédent, nous utilisons ici à nouveau la notion de rendement sur cycle de vie η_{cv} (se référer au Chapitre 4, section §3.3 page 133). Ce rendement peut être relié au rendement sur cycle de fonctionnement η_f à partir de l'expression (4.5a), page 134. En effet, nous avons, en posant E_{ut} l'énergie utile fournie par la machine, la relation suivante entre les deux rendements :

$$\frac{1}{\eta_{cv}} = \frac{E_{ut} + E_{fct} + E_{mat}}{E_{ut}} = \frac{1}{\eta_f} + \frac{E_{mat}}{E_{ut}} \quad (5.18)$$

Nous vérifions dans cette relation que les conditions plus particulièrement propices à l'utilisation du critère d'énergie globale sur cycle de vie dans une conception (c'est-à-dire lorsque η_{cv} est suffisamment différent de η_f) apparaissent lorsque E_{ut} est faible (niveau de puissance moyen faible ou des durées d'utilisations brèves), ou lorsque E_{mat} est élevé (grande série, beaucoup de remplacements, masse élevée, etc.). L'action des deux études de sensibilités présentées ici portent sur E_{ut} par l'intermédiaire d'une action sur le niveau de puissance puis, dans le paragraphe suivant, sur la durée d'utilisation.

Nous proposons ainsi la comparaison de trois optimisations, à Ω^* de 1400 tours par minute pour un couple de consigne C^* de 2, 10 et 50 N.m. Les fronts de solutions Pareto-optimales ainsi que les structures extrêmes sont présentés à la Figure 5.19.

La position des extrêmes est logiquement modifiée par le niveau de puissance de la machine. En effet, avec l'augmentation de la puissance, la contrainte d'échauffement étant identique, les fronts de solutions ne peuvent atteindre des solutions de très faible masse. En ce qui concerne les solutions de faible énergie globale sur cycle de vie, nous constatons qu'avec la puissance de la machine augmente la proportion des pertes de fonctionnement dans E_{acv} . Ceci permet à l'algorithme évolutionnaire de proposer des solutions de plus forte masse lorsque sa puissance nominale est plus élevée. Notons enfin que la position des fronts est naturellement sensible à la puissance de dimensionnement, mais le couple massique des solutions ne présente pas la même sensibilité aux effets d'échelle suivant leur position sur le front de Pareto.

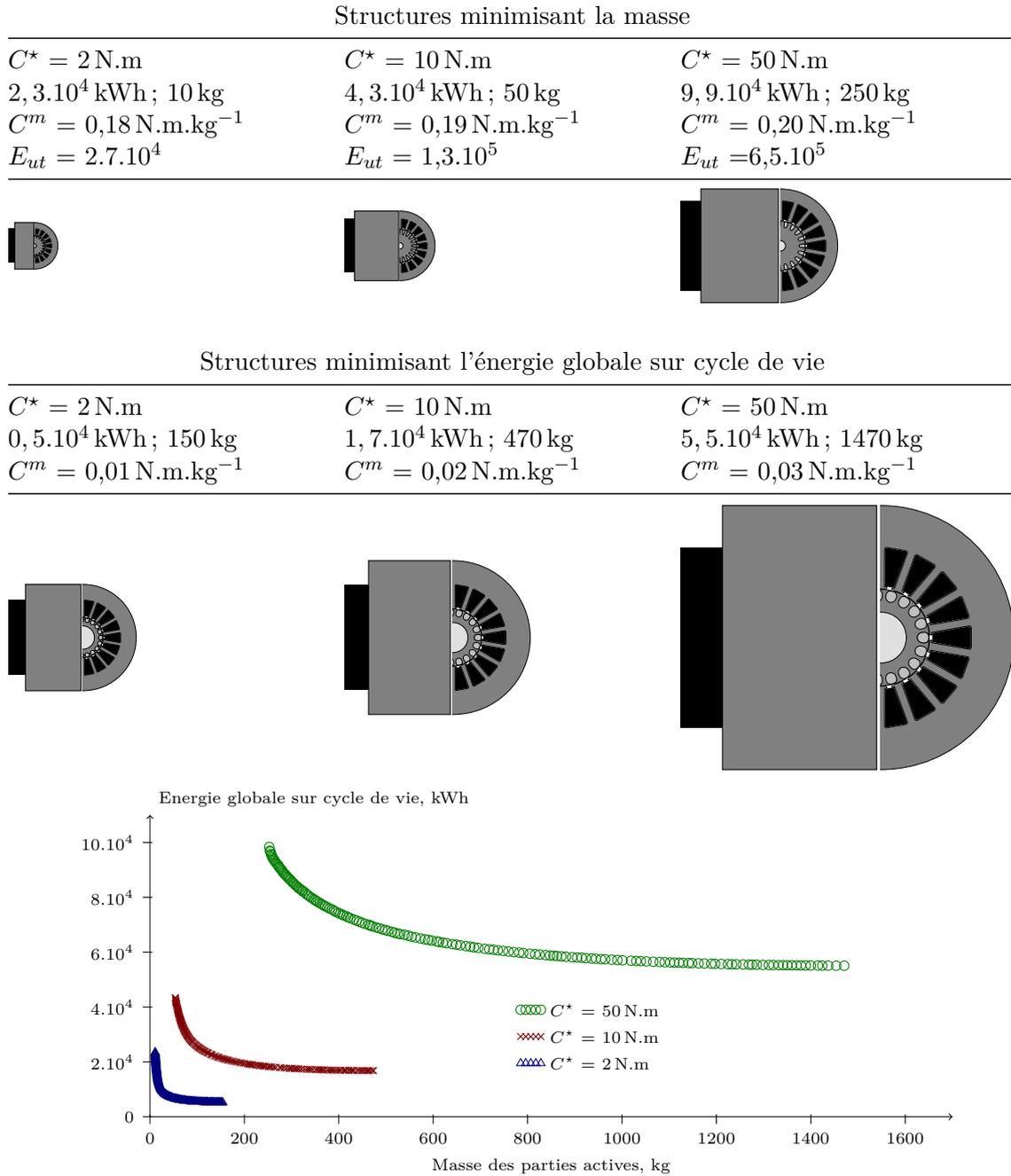


Figure 5.19 – Front de solutions Pareto-optimales et structures de machines associées aux solutions extrêmes pour C^* de 2 N.m, 10 N.m et 50 N.m. Optimisation lancée sur 500 générations de 1000 individus. $\Omega^* = 1400 \text{ tr/min}$. Régime permanent thermique 5 h par jour pendant 10 ans.

Le couple massique s'améliore légèrement avec le couple mais il reste en dessous du couple massique des machines synchrones à aimants permanents. Comme nous l'avons montré précédemment, le nombre de paires de pôles optimal est, à l'inverse des machines synchrones, peu élevé d'où une réduction de masse limitée. Les solutions minimisant E_{acu} voient leur couple massique s'améliorer avec l'augmentation de leur masse.

Comme présenté au Chapitre 4, le rendement sur cycle de vie (dont la définition est proposée à l'équation (4.5a), page 134) représente une grandeur adaptée à la comparaison d'optimisation lors de variations des contributions à l'énergie globale sur cycle de vie. Nous présentons ainsi à la Figure 5.20 l'évolution du rendement sur cycle de vie des solutions dans les trois configurations de puissance nominale de machine, ainsi qu'un rappel des fronts de solutions Pareto-optimales obtenues par minimisation de E_{acu} et E_{fct} .

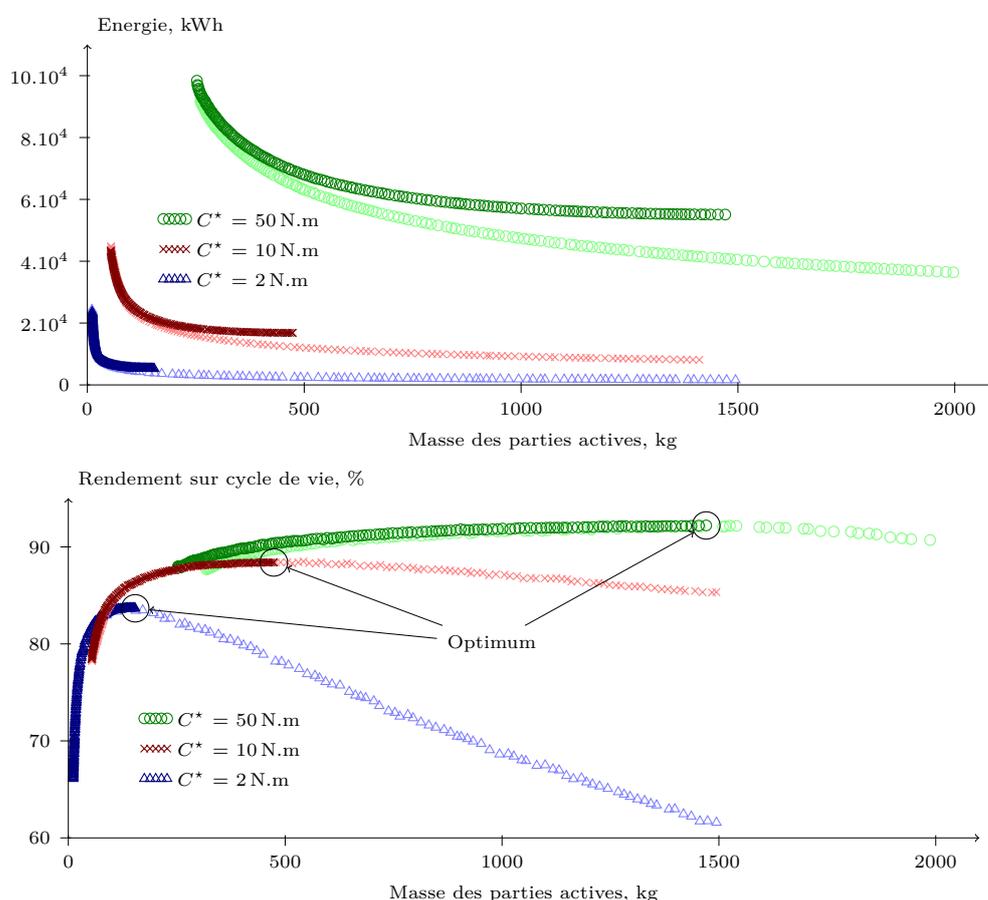


Figure 5.20 – Rendement sur cycle de vie pour C^* de 2 N.m, 10 N.m et 50 N.m, minimisation de E_{acu} (sombre) ou E_{fct} (claire). Optimisation lancée sur 500 générations de 1000 individus. $\Omega^* = 1400 \text{ tr/min}$. Régime permanent thermique 5 h par jour pendant 10 ans.

Le rendement sur cycle de vie atteint un maximum au point minimum d'énergie globale sur cycle de vie. Afin de visualiser ce maximum, nous ajoutons sur cette figure le rendement sur cycle de vie (recalculé après optimisation) des solutions obtenues par minimisation de E_{fct} . Ce maximum est d'autant plus important que la puissance nominale de la machine est élevée. Nous constatons de plus qu'à masse identique, le rendement sur cycle de vie recalculé à partir d'une solution minimisant E_{fct} est très proche de celui d'une solution minimisant réellement E_{acv} . Nous constatons enfin que le rendement sur cycle de vie s'améliore avec l'effet d'échelle, rejoignant les considérations générales sur le rendement en fonctionnement (non représenté ici).

Nous proposons enfin à la Figure 5.21 le rapport entre l'énergie du service utile (l'intégrale du produit couple vitesse, noté E_{ut}) et l'énergie globale sur cycle de vie. Nous sommes ainsi en mesure d'estimer si le composant électrotechnique produit plus d'énergie qu'il n'en consomme sur cycle de vie et dans quelle proportion. Calculé dans le cas de l'énergie, ce rapport peut être indirectement lié à la notion de temps de retour sur investissement énergétique. En effet, nous pouvons ainsi quantifier le temps d'utilisation minimal permettant de rendre ce rapport d'énergies supérieur ou égal à l'unité. Le calcul de ce rapport est proche de celui du rendement sur cycle de vie, mais donne une valeur qu'il est plus facile de lire, que ce soit pour des industriels ou même le grand public.

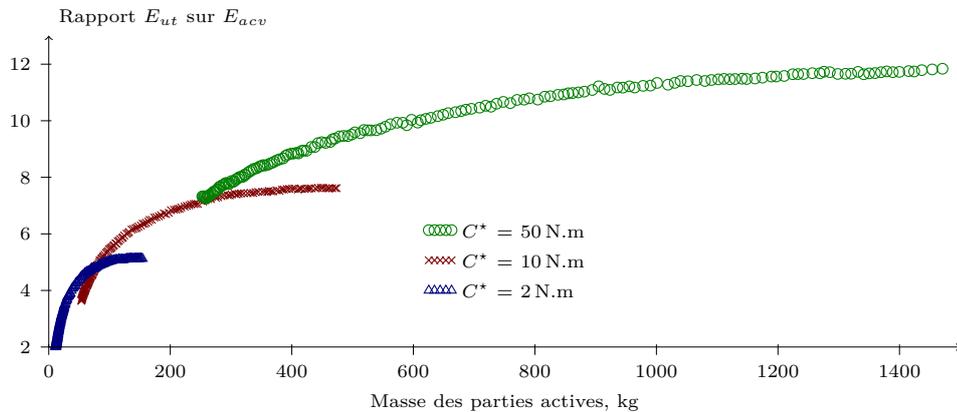


Figure 5.21 – Rapport entre l'énergie du service utile et l'énergie globale sur cycle de vie pour C^* de 2 N.m, 10 N.m et 50 N.m. Optimisation lancée sur 500 générations de 1000 individus. $\Omega^* = 1400 \text{ tr/min}$. Régime permanent thermique 5 h par jour pendant 10 ans.

Nous constatons ici que pour les trois niveaux de puissances considérés le rapport est toujours supérieur à l'unité. Ainsi le moteur fournit sous forme d'énergie utile toujours plus que l'énergie qu'il consomme sur l'ensemble de son cycle de vie. Nous retrouvons également une disposition des fronts de solutions présentant un meilleur rapport énergie utile E_{acv} avec l'augmentation de l'effet d'échelle, tout comme à la Figure 5.20.

3.3.2 Durée d'utilisation

Un autre moyen d'action sur la contribution des pertes de fonctionnement dans l'énergie globale sur cycle de vie est de faire varier la durée d'utilisation de la machine. Les résultats d'optimisation obtenus dans ce cas présentent des caractéristiques différentes de celles obtenues par variation de la puissance nominale. En effet, ils ne font plus intervenir d'effet d'échelle, le point de fonctionnement étant identique pour toutes les simulations. Nous pouvons dès lors les comparer au rendement en fonctionnement pour le point de fonctionnement défini par $C^* = 10 \text{ N.m}$ et $\Omega^* = 1400 \text{ tours/min}$. Nous présentons à la Figure 5.22 les solutions extrêmes et les fronts de Pareto pour une durée d'utilisation par jour de 10, 5 et 2,5 h par jour.

Contrairement aux optimisations effectuées pour différentes puissances nominales, les solutions atteignent ici une masse minimale du même ordre de grandeur. En effet, le couple à développer est le même pour les trois optimisations, n'entraînant pas de variation significative des paramètres géométriques. Dans cette partie du front de Pareto, la durée d'utilisation joue donc uniquement sur le niveau de l'énergie globale sur cycle de vie.

Les solutions minimisant l'énergie globale sur cycle de vie sont d'autant plus lourdes que le temps d'utilisation est grand, rejoignant dans cette partie du front de Pareto les commentaires de la sensibilité des résultats d'optimisation à la puissance nominale de la machine.

Nous retrouvons donc à la Figure 5.23 des résultats similaires à ceux proposés au Chapitre 4, à la section §3.3, page 133 : le rendement sur cycle de vie atteint un maximum (au point de minimum d'énergie sur cycle de vie) contrairement au rendement en fonctionnement (indépendant de la durée d'utilisation). De plus, avec l'augmentation de la durée d'utilisation, le rendement sur cycle de vie tend à « suivre » sur une plus large partie du front de Pareto le rendement en fonctionnement.

Les résultats d'optimisation sont sensibles au cycle de fonctionnement auquel la machine est soumise, même si ce cycle de fonctionnement est défini par un point unique couple-vitesse et une durée d'utilisation. Enfin l'augmentation de la durée d'utilisation améliore le rendement sur cycle de vie mais augmente aussi la consommation globale d'énergie sur cycle de vie.

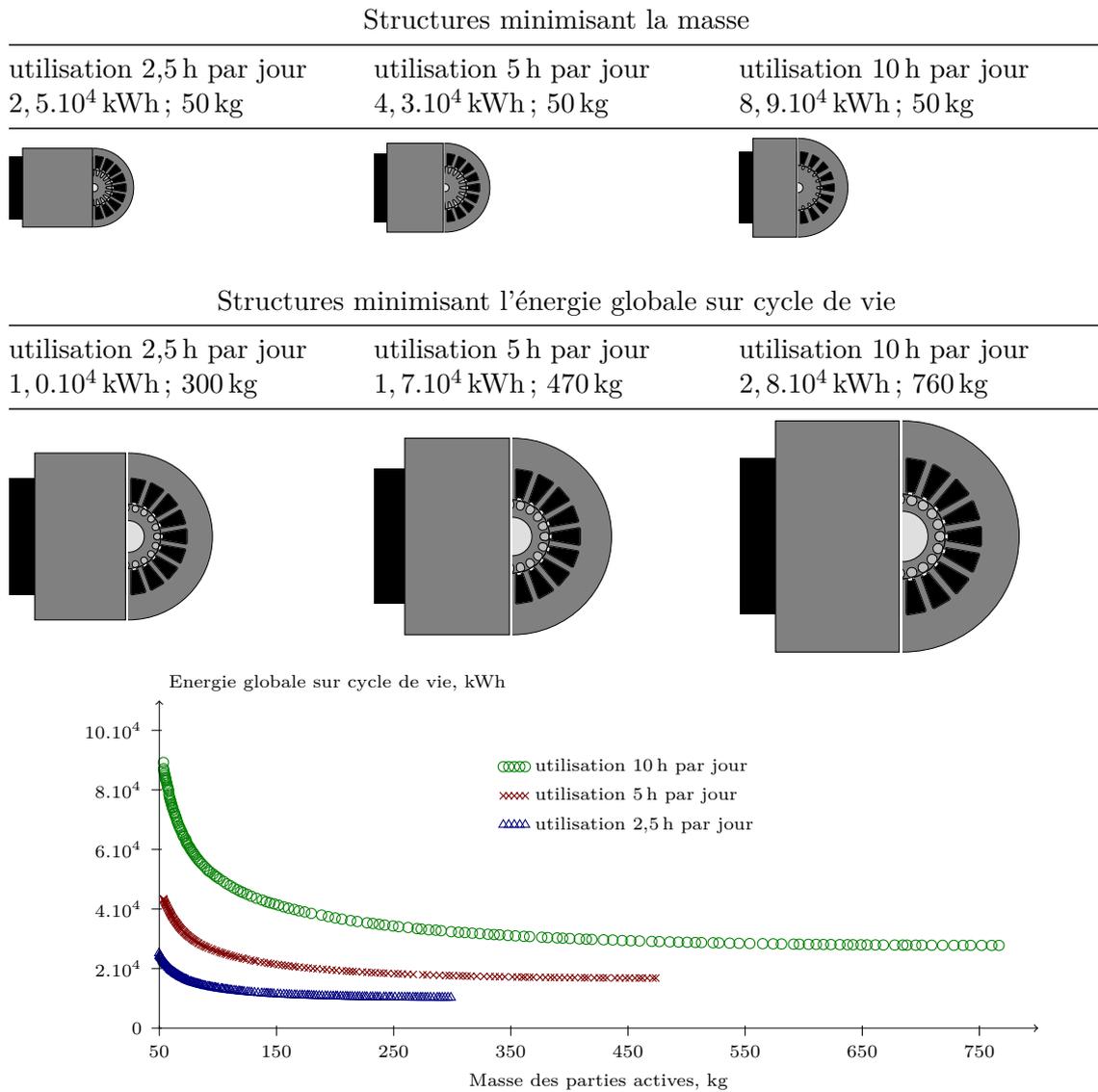


Figure 5.22 – Front de solutions Pareto-optimales et structures de machines associées aux solutions extrêmes pour une utilisation de 10 h, 5 h et 2,5 h par jour pendant 10 ans. Optimisation lancée sur 500 générations de 1000 individus. C^* de 10 N.m $\Omega^* = 1400$ tr/min. Régime permanent thermique.

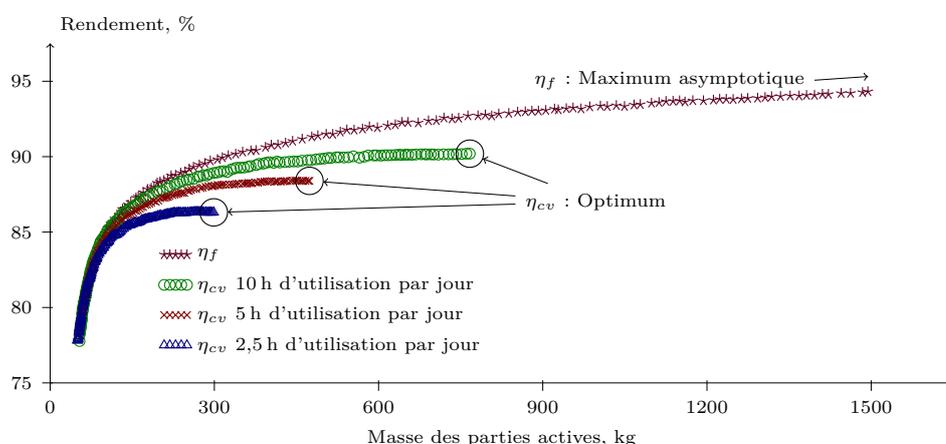


Figure 5.23 – Rendement sur cycle de vie et rendement de fonctionnement pour une durée d'utilisation de 10, 5 et 2,5 h par jour pendant dix ans. Optimisation lancée sur 500 générations de 1000 individus. $C^* = 10 \text{ N.m}$ et $\Omega^* = 1400 \text{ tr/min}$. Régime permanent thermique 5 h par jour pendant 10 ans.

3.3.3 Changement des conditions de refroidissement

La dernière étude de sensibilité concerne le modèle thermique utilisé dans les optimisations, par l'intermédiaire du refroidissement de la machine. En effet, la contrainte thermique joue un rôle significatif dans le dimensionnement que ce soit en régime thermique permanent et transitoire, sur le vieillissement, etc.

Nous présentons à la Figure 5.24 les fronts de solutions Pareto-optimales obtenus pour deux coefficients de transfert thermique : 20 et 80 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ce qui équivaut à une vitesse de l'air à la surface du carter d'environ 5 m.s^{-1} et 25 m.s^{-1} . Nous constatons qu'un meilleur refroidissement permet d'atteindre des solutions à plus faible énergie globale sur cycle de vie et plus forte masse, ce qui n'apparaît pas dans les comparaisons présentées jusqu'à présent. De même, il est possible d'aller chercher des solutions de masse plus faible, présentant plus de pertes (donc une énergie globale sur cycle de vie supérieure). En effet, celles-ci sont mieux évacuées, permettant d'atteindre la butée de contrainte thermique pour des masses plus faibles et des énergies de fonctionnement supérieures, comme nous pouvons le constater à la Figure 5.24.

Notre modélisation du type de refroidissement ne considère pas ses impacts environnementaux. Il est donc naturel que les solutions obtenues avec un meilleur refroidissement soient plus intéressantes. Gardons toutefois à l'esprit qu'un meilleur système de refroidissement, s'il permet d'améliorer le rendement sur cycle de fonctionnement des machines, augmente a priori ses coûts environnementaux sur les phase « non utiles » (extraction des matières premières, transport, etc.).

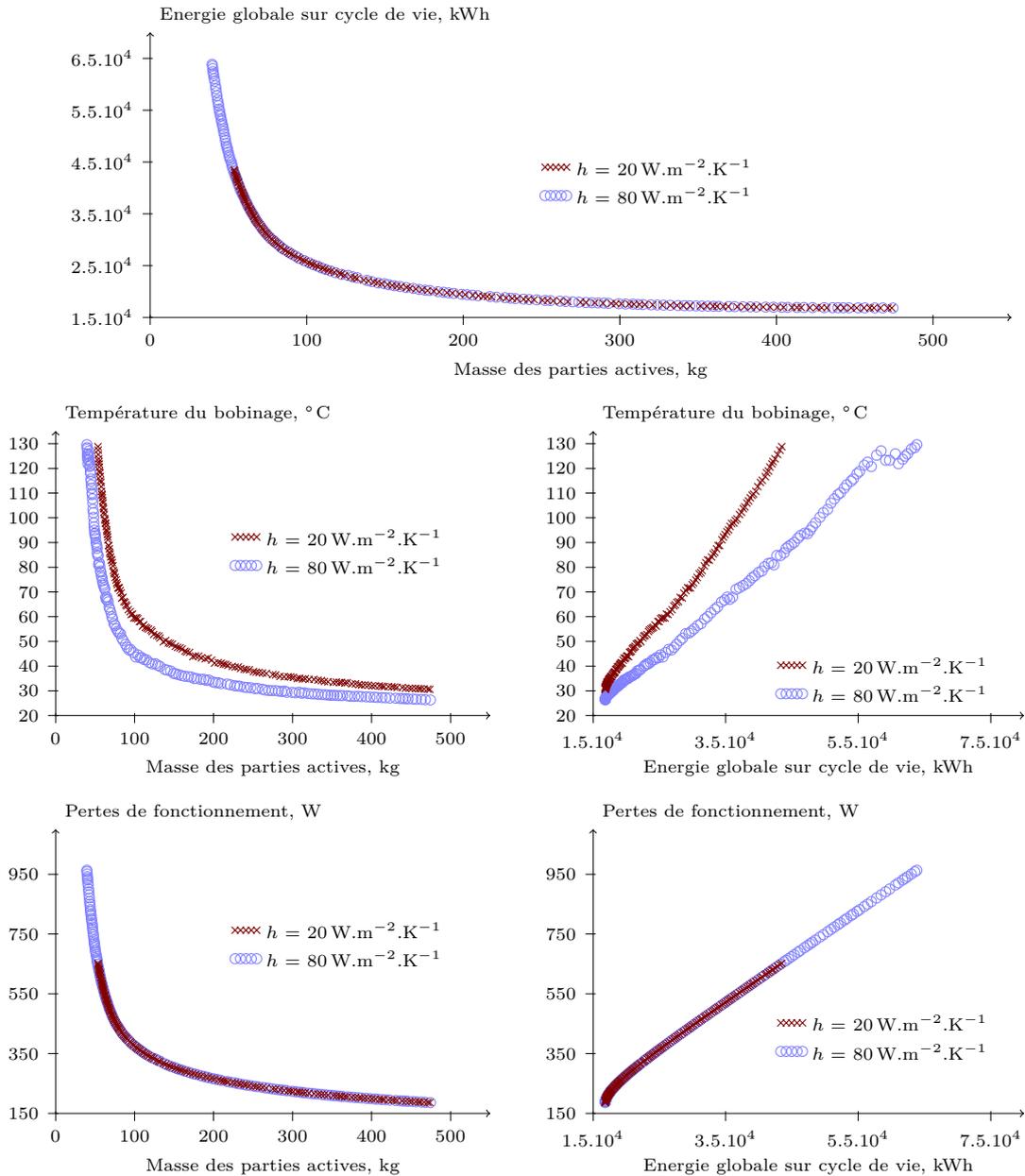


Figure 5.24 – Front de solutions Pareto-optimales, température maximale atteinte par le bobinage et pertes de fonctionnement pour un coefficient de transfert thermique de $20 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ et de $80 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Optimisation lancée sur 500 générations de 1000 individus. C^* de $10 \text{ N.m } \Omega^* = 1400 \text{ tr/min}$. Régime permanent thermique, 5 h/jour pendant 10 ans.

3.3.4 Prise en compte des parties non actives

Les masses des parties constitutives de la machine ont le même impact environnemental qu'elles soient actives ou non. Cependant, contrairement aux parties actives dont les dimensions ont une action sur les pertes de fonctionnement et les autres coûts énergétiques sur cycle de vie, les masses inactives n'ont qu'une action sur les phases ne participant pas au service utile de la machine.

Nous présentons à la Figure 5.25 les fronts de solutions Pareto-optimales d'optimisation minimisant la masse totale de la machine (masse active et inactive) et la seule masse des parties actives. Les fronts de Pareto sont disposés selon la masse totale (celle-ci est recalculée dans le cas des optimisations sur la seule masse des parties actives). La prise en compte des masses inactives a un impact sur la disposition des solutions minimisant E_{acv} . Les solutions minimisant la masse étant en butée de contrainte thermique, les deux optimisations tendent vers une solution identique.

Les deux optimisations proposent au final une répartition différente entre les parties actives et inactives. Ainsi une optimisation portant sur la masse totale diminue la masse des parties inactives, ce qui entraîne une augmentation de la masse des parties actives (à masse totale identique). De ce fait, la solution minimisant E_{acv} est atteinte pour une masse totale plus faible (lors de l'optimisation portant sur la masse totale) correspondant à une masse des parties actives quasi-identique à celle du point minimisant E_{acv} obtenu lors de l'optimisation portant sur la seule masse des parties actives.

Le fait que la masse des parties actives soit supérieure (lors de l'optimisation portant sur la masse totale) permet à la machine de présenter d'une part des pertes de fonctionnement plus faibles, compensé par un rendement sur cycle de vie moins bon à service utile identique. Rappelons que le rendement sur cycle de vie dépend indirectement de la masse de la machine par le calcul des coûts énergétiques des phases de production, transport, etc. Le rendement sur cycle de vie peut donc varier typiquement en changeant les hypothèses de modélisation de la machine. Cette propriété en fait un outil de caractérisation générale à l'échelle du cycle de vie.

Le calcul de la masse des parties actives étant directement lié à la géométrie de la machine, il est intéressant de regarder dans quelle mesure les résultats d'optimisation sont sensibles à la prise en compte des masses inactives vis-à-vis de l'effet d'échelle. Nous proposons ainsi à la Figure 5.26 la répartition des solutions Pareto-optimales pour trois couples de consigne (2, 10 et 50 N.m) pour des optimisations prenant en compte ou non les parties inactives.

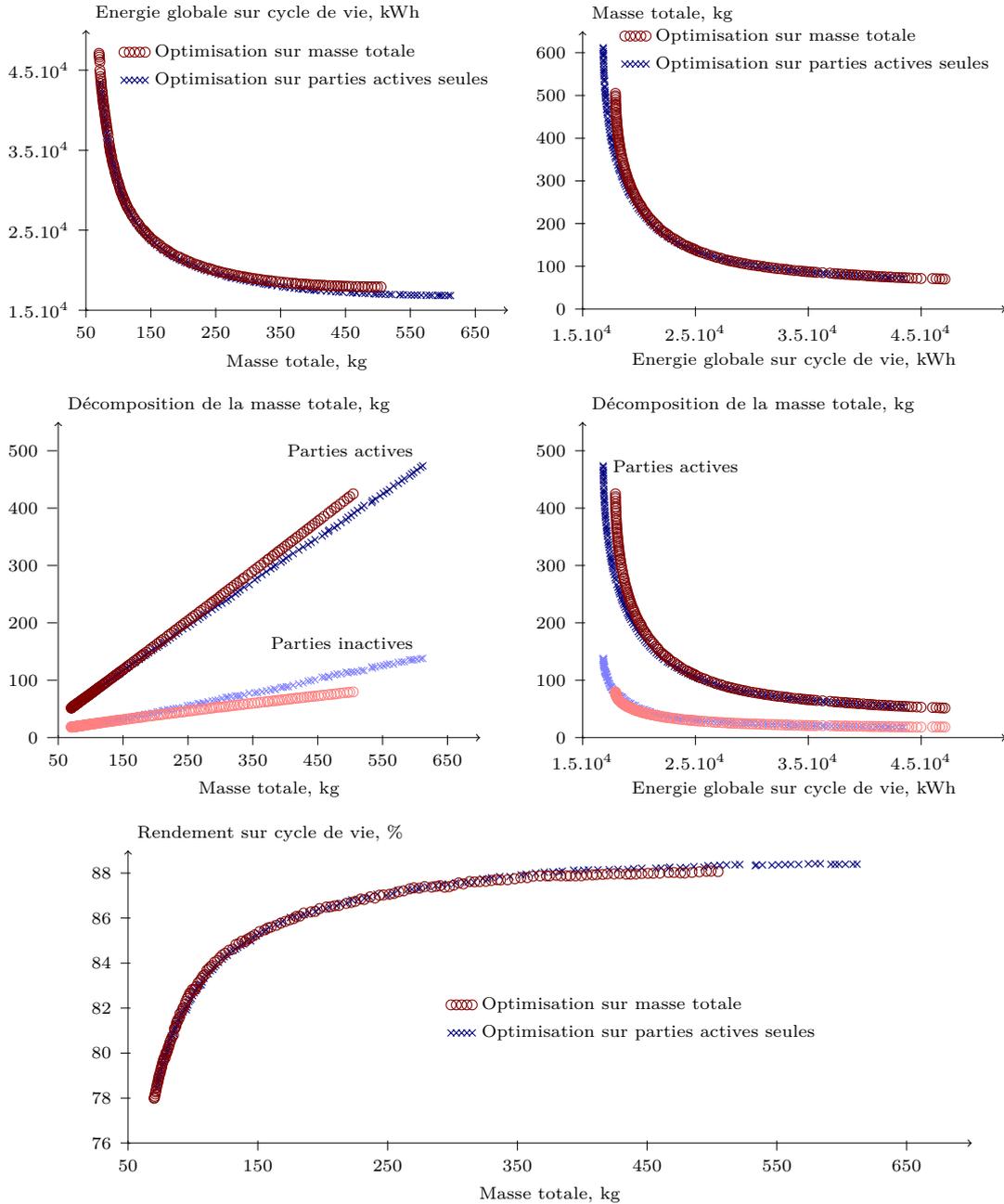


Figure 5.25 – Front de solutions Pareto-optimales, masses et rendement sur cycle de vie pour une optimisation incluant les parties inactives dans le calcul de la masse et sur la seule masse des parties actives. Optimisation lancée sur 500 générations de 1000 individus. $C^* = 10 \text{ N.m}$; $\Omega^* = 1400 \text{ tr/min}$. Régime permanent thermique 5 h par jour pendant 10 ans.

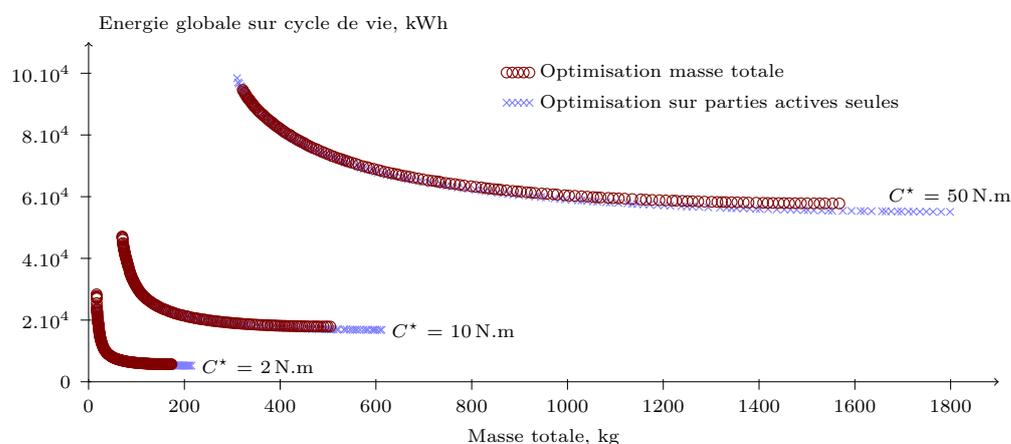


Figure 5.26 – Front de solutions Pareto-optimales, pour une optimisation incluant les parties inactives dans le calcul de la masse (claire) et sur la seule masse des parties actives (sombre). Optimisation lancée pour un couple de consigne C^* de 2, 10 et 50 N.m, $\Omega^* = 1400$ tr/min. Optimisation lancée sur 500 générations de 1000 individus. Régime permanent thermique 5 h par jour pendant 10 ans.

La différence entre les optimisations avec ou sans prise en compte des parties inactives se situe dans la partie d'énergie globale sur cycle de vie minimale. Ceci s'explique par le fait qu'il s'agit de la zone du front de Pareto où la contribution de E_{fct} dans E_{acv} est la plus faible, renforçant la sensibilité des solutions à la contribution directement proportionnelle à la masse des différentes constituantes de la machine.

Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre la minimisation de l'énergie globale sur cycle de vie d'un modèle de machine asynchrone triphasée à cage dont l'alimentation (fréquence et tension) est variable. La modélisation électrique se fait en linéaire sur une machine équivalente d'une spire, en régime permanent thermique. Ce chapitre permet notamment de confirmer l'intérêt de l'approche d'analyse sur cycle de vie dans le cas d'une optimisation où le nombre de paramètres est large, ainsi que dans des conditions d'alimentation du convertisseur d'énergie variables.

L'optimisation de l'alimentation nécessite des calculs spécifiques qui dépendent du nombre de points de fonctionnement considérés dans le cycle de fonctionnement. Nous nous sommes placés dans le cas d'un point de fonctionnement unique défini par un couple et une vitesse de consigne fixes sur une durée donnée par jour, répétée pendant dix ans. L'action sur la durée par jour ou sur le nombre d'années est équivalent dans ce cas de figure. Le choix des paramètres d'optimisation est $(v_s; f_s)$ dans notre cas.

Beaucoup d'éléments sont ici en place pour prendre en compte le convertisseur statique. Aux éléments d'études à notre disposition, il faut intégrer le dimensionnement du convertisseur. Nous n'avons malheureusement pas trouvé, à ce jour, de données correctes concernant les impacts environnementaux des convertisseurs statiques.

Dans les conditions d'alimentation optimisée nous avons constaté et justifié qu'il n'est pas bénéfique d'augmenter le nombre de paires de pôles à l'inverse des machines synchrones. Ceci est notamment dû à une augmentation importante des pertes Joules avec le nombre de paires de pôles.

Les résultats d'optimisation se montrent sensibles à l'optimisation de l'alimentation. Nous avons retrouvé les résultats des chapitres précédents concernant les contributions à l'énergie globale sur cycle de vie suivant que le critère de minimisation d'énergie est centré sur la phase de fonctionnement ou élargi au cycle de vie de la machine.

Nous avons étudié ensuite la sensibilité des résultats d'optimisation au niveau de puissance nominale de la machine (effet d'échelle) et à sa durée d'utilisation par jour. Ces deux variations jouent directement sur l'importance des pertes de fonctionnement dans l'énergie globale sur cycle de vie, mais n'ont pas le même impact sur la disposition des fronts de solutions. En effet, un changement du niveau de puissance augmente le niveau des pertes de fonctionnement alors qu'une action sur la durée d'utilisation par jour ne joue que sur leur cumul.

Une étude de sensibilité aux conditions de refroidissement de la machine est ensuite menée en augmentant la vitesse de l'air à la surface du carter. Sans prise en compte des coûts environnementaux de sa mise en place, une amélioration du refroidissement permet d'évacuer plus de pertes donc de diminuer la masse minimale sous contrainte thermique et propose aussi une meilleure solution d'énergie globale sur cycle de vie. Ce dernier point est à relativiser du fait de la non prise en compte ici des impacts environnementaux du dispositif de refroidissement.

Enfin nous avons terminé par la prise en compte des parties inactives dans la conception de la machine. Ceci ajoute une masse supplémentaire dont ne dépend pas le service utile, ce qui revient à augmenter la contribution de E_{mat} dans E_{acv} devant E_{fct} . De ce fait, les résultats présentent une sensibilité à cette masse supplémentaire sur les solutions d'énergie globale sur cycle de vie minimale.

Ce modèle de machine asynchrone triphasée constituait le dernier exemple que nous traitions dans cette thèse. L'ajout de l'optimisation de l'alimentation représente un premier pas vers la conception d'un système complet comprenant la machine et son convertisseur statique (dont sa commande).

Conclusion générale

L'estimation des impacts environnementaux d'un produit dès sa conception est un processus délicat qui peut monopoliser un temps et un investissement conséquents : l'éco-conception nécessite en effet de prédire le cycle de vie d'un produit qui n'existe pas encore. Il existe cependant plusieurs moyens de diminuer la complexité d'un tel processus. Le premier est de se baser sur des études d'analyses sur cycle de vie préalables, réunies dans des bases de données d'inventaires. Le second est de partir de modèles connus et d'en améliorer les performances environnementales, il s'agit alors d'éco-dimensionnement.

Les composants du Génie Electrique présentent la spécificité d'être consommateurs d'énergie durant leur phase de fonctionnement. En effet, le fait qu'ils consomment de l'énergie lorsqu'ils fournissent le service pour lequel ils sont conçus entraîne des comportements de conception sur critères environnementaux différents de ceux observés pour des produits qui ne consomment aucune énergie pour fournir leur service utile. Ainsi, un objectif de réduction des impacts environnementaux peut ne pas avoir d'effets significatifs sur le dimensionnement du produit considéré, suivant les impacts environnementaux et les phases du cycle de vie considérés. De ce fait, avant même de lancer une étude d'éco-conception, il est souvent préférable de mener une première analyse sur cycle de vie d'un produit similaire afin de situer les interactions principales du produit avec son environnement durant son cycle de vie.

Du fait des pertes de fonctionnement, tous les composants électrotechniques ne présentent pas la même sensibilité de conception aux critères environnementaux. Afin d'établir une première classification sur l'importance de ces pertes de fonctionnement dans le cumul des impacts environnementaux, nous raisonnons, sur l'énergie globale sur cycle de vie, incluant, dans le cas de la machine asynchrone monophasée étudiée, le potentiel de réchauffement climatique.

La première étude d'optimisation de composant électrotechnique sur cycle de vie, avec comme critère principal d'optimisation l'énergie globale sur cycle de vie, concernait un transformateur monophasé simple, alimenté par une tension et une fréquence fixes. Il est apparu qu'il existait des solutions conduisant à une consommation d'énergie globale sur cycle de vie minimale et à une masse optimale. Ceci ne s'est pas retrouvé lors des conceptions minimisant les seules pertes de fonctionnement. Ainsi, les deux contributions à l'énergie globale sur cycle de vie E_{fct} et E_{mat} se sont avérées contradictoires en fonction de l'objectif de masse des parties actives. Les résultats d'optimisation se sont montrés sensibles aux proportions des différents coûts énergétiques ainsi qu'au matériau constitutif du bobinage. Les résultats d'optimisation des composants électrotechniques présentant des cycles de fonctionnement brefs ont montré une grande sensibilité aux critères énergétiques. Enfin la prise en compte du vieillissement a permis de mettre en évidence l'existence d'une température maximale optimale, la durée d'utilisation imposant, le cas échéant, un certain nombre de remplacements du transformateur sur la durée d'usage.

Nous avons ensuite proposé une modélisation adaptée à des machines asynchrones dédiées à l'entraînement de volets roulants puis une optimisation de leur performance environnementale sur la base de seulement deux paramètres : la longueur active et le nombre de spires par phase. L'optimisation sur cycle de vie de ce type de moteur est justifiée par un faible ratio entre la durée cumulée de fonctionnement et la durée de vie totale, proposant ainsi un très bon support à l'application de critères environnementaux lors de leur conception. La forte saturation du circuit magnétique dans ce type de moteur nous a amené à considérer une modélisation par éléments finis 2D secondée d'un post-traitement prenant en compte les effets 3D. Les résultats d'optimisation n'ont pas montré les mêmes sensibilités aux coûts énergétiques suivant que ceux-ci concernent la phase de fonctionnement (mix énergétique) ou les autres phases du cycle de vie de la machine (matériau constitutif). De plus, les résultats d'optimisation ont montré une grande sensibilité à l'utilisation qui est faite de la machine (exprimée dans ce chapitre sous la forme du nombre de cycles par jour). Nous avons introduit à cette occasion la définition originale d'un rendement sur cycle de vie. Ce rendement est représentatif de l'ensemble des consommations énergétique du moteur sur son cycle de vie plutôt que sur sa seule phase de fonctionnement. Celui-ci atteint un optimum contrairement « classique » au rendement sur cycle de fonctionnement qui n'est pas approprié à ce type d'application.

En dernier lieu, nous avons étudié la minimisation de l'énergie globale sur cycle de vie d'un modèle de machine asynchrone triphasée à cage dont l'alimentation (fréquence et tension) a été incluse dans le paramétrage. Nous nous sommes placés dans le cas d'un point de fonctionnement unique défini par un couple et une vitesse de consigne fixes sur une durée donnée par jour. Ces travaux ont montré, déjà sur un cycle de fonctionnement simple, des temps de calcul significatifs, des problèmes de convergences des algorithmes d'optimisation et une certaine difficulté de mise en place du point de vue algorithmique. Nous avons étudié la sensibilité des résultats d'optimisation au niveau de puissance nominale de la machine (effet d'échelle) et à sa durée d'utilisation par jour. Ces deux variations jouent directement sur l'importance des pertes de fonctionnement dans l'énergie globale sur cycle de vie, mais n'ont pas le même impact sur la disposition des fronts de solutions. Nous avons terminé

cette étude par la prise en compte des parties inactives dans la conception de la machine. Ceci ajoute une masse supplémentaire dont ne dépend pas le service utile, ce qui revient à augmenter la contribution de E_{mat} dans E_{acv} devant E_{fct} . De ce fait, les résultats présentent une sensibilité à cette masse supplémentaire sur les solutions d'énergie globale sur cycle de vie minimale.

Perspectives

Du fait de la généralité de l'analyse sur cycle de vie, les perspectives à ces travaux sont nombreuses. Dans le domaine du Génie Electrique, nous pouvons notamment souligner l'importance de considérer des cycles de fonctionnement complexes dans la conception de composants sur critères environnementaux. La phase de fonctionnement ayant une importance considérable dans le processus d'éco-conception, sa modélisation précise est nécessaire et doit, le cas échéant, inclure une prise en compte des régimes thermiques transitoires. Les temps de simulations deviennent alors rapidement significatifs, voire prohibitifs.

Les cas d'études présentés dans ce mémoire de thèse relèvent plus du domaine de l'éco-dimensionnement que de celui de l'éco-conception en ce sens que les modèles utilisés sont définis de manière relativement stricte, ne laissant pas beaucoup de latitude à l'algorithme d'optimisation. Envisager d'inclure des changements plus technologiques (moyens de productions, matériaux constitutifs, facilité de déconstruction, méthodes de bobinage, type de refroidissement, etc.) constitue un défi particulier à l'éco-conception qu'il sera particulièrement intéressant (et difficile) d'aborder dans une dynamique de conception par optimisation.

En outre, inclure le convertisseur statique dans l'objet électrotechnique modélisé constitue un travail important à mener lors d'une éco-conception, que ce soit du point de vue des impacts environnementaux des différents sous-composants ou du dimensionnement approprié de l'alimentation.

A ce sujet, il sera aussi utile de travailler plus spécifiquement sur la pertinence de la délimitation de la frontière du champ d'étude d'une éco-conception dans le domaine du Génie Electrique. En effet, faut-il s'arrêter aux seules parties actives de l'ensemble convertisseur-machine, ou envisager d'aller plus loin en considérant les parties inactives, ou encore plus loin avec la modélisation du système global (nous pensons notamment à des applications embarquées), etc. ? La sensibilité des résultats d'optimisation à la définition de la frontière du champ d'étude selon l'application considérée représente une perspective de travail complexe mais nécessaire afin d'asseoir complètement la crédibilité des futures éco-conceptions menées dans le domaine du Génie Electrique.

Il faut de plus envisager à terme de travailler sur un plus grand nombre d'impacts environnementaux et non plus la seule énergie globale sur cycle de vie associé au potentiel de réchauffement climatique. Ceci ne présente pas de difficulté conceptuelle particulière mais nécessite un critère pratique de comparaison. En effet, la mise en place d'une unité normalisée implique une pondération arbitraire des différents impacts environnementaux, donc leur comparaison intrinsèque. Ce problème de choix peut être évité par une optimisation multi-critères avec un algorithme du type de celui utilisé dans ces travaux, mais ne proposera plus de solution optimale si aucun critère dominant n'est retenu au final.

Un autre point à considérer dans de prochaines études est la prise en compte des phases d'assemblage et de recyclage. Ce point reste actuellement difficile à mettre en œuvre autrement que par modélisation statistique d'une population représentative de composants, nécessitant la définition d'une unité fonctionnelle d'analyse sur cycle de vie plus large que le seul composant électrotechnique découplé de ses processus de production. Ceci complique de plus le couplage entre la phase de fonctionnement et le reste du cycle de vie des composants considérés.

Sur des considérations plus générales, il est envisageable à partir de ces travaux d'optimiser la durée de vie d'un composant en prenant en compte son vieillissement sur une durée d'usage fixée à l'avance. Ce type de conception proposerait des composants spécifiques à un usage donné, une limitation des utilisations possibles entraînant aussi une limitation des impacts environnementaux. Dans ce domaine, il est fondamental de disposer de modèles de vieillissement en fonction de leur utilisation, notamment fondés sur les différents mécanismes de dégradation en présence (température, tension, etc.). Ces données auront un effet significatif sur les études d'éco-conception à venir.

Les études d'analyse sur cycle de vie et les procédures d'éco-conception ne présentent pas encore les retours d'expérience suffisants pour être qualifiées de matures dans le domaine du Génie Electrique. La multiplication de travaux prospectifs ainsi que l'application des normes environnementales par les industriels du domaine va inévitablement conduire à une meilleure compréhension des interactions entre les composants électrotechniques et leur environnement d'une part, à une meilleure compréhension des mécanismes de comportement dans le temps (régimes transitoires, vieillissement, etc.) mais aussi à une meilleure prise en compte de leurs phases de production et de recyclage (maintenance, démontage, réutilisation, etc.). Tous ces domaines sont déjà étudiés séparément. Leur réunion dans des études globales, bien que complexes, ne pourra que permettre des avancées significatives dans l'optique d'une consommation et une production dont l'impact sur l'environnement n'est plus remis en cause.

Annexes

Bases de données extraite d'inventaire d'analyse sur cycle de vie

Nous donnons dans ce qui suit un extrait de base de données inventaire d'analyse sur cycle de vie sur deux impacts environnementaux et quatre ensembles de systèmes. Ces tableaux sont construits à partir du classeur « Bilan Produit 2008 » [BP0]. Il s'agit d'un classeur Excel disponible sur le site de l'ADEME permettant d'estimer les impacts environnementaux des produits [BP0]. La base de données intégrée à cet outil a été établie en collaboration avec EcoInvent Centre, Swiss Centre for life cycle inventories (version 2.0 des données).

Deux impacts environnementaux sont présentés ici : un indicateur de ressources, la consommation en énergie non renouvelable et un indicateur d'impacts, l'effet de serre. La consommation d'énergie renouvelable exprime la quantité totale d'énergie fossile consommée sur tout le cycle de vie du produit, selon la définition de cette énergie primaire par les organismes internationaux. L'indicateur d'effet de serre quant à lui exprime le potentiel d'effet de serre additionnel qu'engendre le produit considéré sur l'ensemble de son cycle de vie. Le calcul repose sur le modèle de caractérisation développé par l'Intergovernmental Panel on Climate Change, GIEC en français [GIE]. Ce modèle caractérise les émissions dans l'air susceptibles de participer directement au potentiel de réchauffement climatique global (*Global Warming Potential* en anglais) à l'horizon 100 ans (GWP 100a). L'effet de serre additionnel est impliqué dans les problématiques de changement climatique d'origine anthropique qui commence à affecter la planète. On peut citer l'élévation du niveau moyen des océans, la hausse des températures moyennes, la chute de la bio-diversité, etc.

Table A.1 – *Consommation d'énergie primaire et potentiel de réchauffement climatique dus à quelques procédés sur les métaux du Génie Electrique et à divers moyens de transport [BP0].*

Objet d'analyse	Energie primaire, kWh	GWP, kg CO ₂ éq.
Procédés sur un kilogramme de métaux		
Anodisation	21,0	4,09
Emboutissage profond, presse 1000 t, une seule passe	1,69	0,423
Fabrication moyenne en acier	8,39	1,79
Filage d'acier	1,08	0,337
Fraisage acier	14,6	3,56
Laminage de feuilles acier	1,74	0,359
Laminage de profils acier	0,539	0,169
Laminage de tubes acier	1,19	0,371
Soudage à l'arc acier	0,567	0,125
Extrusion de profils aluminium	5,17	1,02
Fabrication moyenne en aluminium	13,8	3,21
Fabrication moyenne en cuivre	8,64	1,85
Filage de cuivre	11,9	2,16
Fraisage aluminium	37,8	9,72
Laminage de feuille aluminium	3,00	0,591
Laminage de feuille cuivre	6,44	1,20
Soudure à l'arc, aluminium	0,808	0,189
Soudure Aluminium par point	0,653	0,188
Transport d'un kilogramme sur un kilomètre		
Fret aérien Europe	$9,11 \cdot 10^{-3}$	$1,96 \cdot 10^{-3}$
Fret aérien intercontinental	$4,53 \cdot 10^{-3}$	$1,08 \cdot 10^{-3}$
Train de fret européen	$1,98 \cdot 10^{-4}$	$3,94 \cdot 10^{-5}$
Camionnette	$9,19 \cdot 10^{-3}$	$1,96 \cdot 10^{-3}$
Camion <16 t moyenne européenne	$1,53 \cdot 10^{-3}$	$3,32 \cdot 10^{-4}$
Camion >16 t moyenne européenne	$5,92 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-4}$
Camion >32 t moyenne européenne	$5,69 \cdot 10^{-4}$	$1,16 \cdot 10^{-4}$
Tanker fluvial	$1,65 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-5}$
Tanker transocéanique	$2,47 \cdot 10^{-5}$	$5,63 \cdot 10^{-5}$

Table A.2 – *Consommation d'énergie primaire et potentiel de réchauffement climatique dû à la production d'énergie électrique et des métaux du Génie Electrique [BP0].*

Objet d'analyse	Energie primaire, kWh	GWP, kg CO ₂ éq.
Production d'un kilowattheure d'énergie finale		
Electricité basse tension Europe	3,11	0,563
Electricité basse tension France	3,61	0,108
Electricité haute tension Europe	2,76	0,495
Electricité haute tension France	3,25	0,0921
Electricité charbon	3,44	1,07
Electricité éolienne 0,5 MW	0,0503	0,0118
Electricité éolienne 30 kW	0,226	0,0556
Electricité fuel moyenne France	3,03	0,756
Electricité gaz naturel cycle combiné optimum	2,06	0,423
Electricité gaz naturel France	2,29	0,486
Electricité nucléaire France	3,75	0,00622
Electricité photovoltaïque	0,322	0,0695
Electricité hydraulique moyenne France	0,0109	0,00357
Production d'un kilogramme de matériau		
Acier courant	6,33	1,49
Acier courant faiblement allié	7,64	1,79
Acier de coulée	6,81	1,51
Acier neuf	6,44	1,66
Acier neuf faiblement allié	8,50	2,14
Acier recyclé	2,40	0,431
Aluminium mix européen	31,4	8,03
Aluminium mix moulé européen	11,9	2,95
Aluminium mix forgé européen	40,3	10,4
Aluminium neuf	44,4	11,5
Aluminium recyclé (déchets anciens)	6,22	1,39
Aluminium recyclé (première fusion)	2,05	0,419
Cuivre (recyclé)	7,56	1,83
Cuivre courant	8,67	2,02

Démarche d'analyse sur cycle de vie

Dans cette annexe sont décrites plus en détail les quatre étapes principales d'une analyse sur cycle de vie. La phase d'étude, la phase d'inventaire des impacts, la phase d'analyse des impacts et enfin la phase d'interprétation [CGM⁺05].

1. Définition des objectifs de l'analyse sur cycle de vie

1.1 Problématique

Cette première étape a pour objectif de poser le problème. L'analyse sur cycle de vie est en général concernée par le service rendu du système analysé (ce service peut même faire l'objet de l'analyse lui-même). Les objectifs de l'étude rapportée à un système doivent donc cerner de façon non ambiguë l'application visée et les raisons de cette étude (pour qui elle est faite et dans quel cadre). Ceci conditionne l'expression finale des résultats. L'analyse peut être menée dans un but de développement de nouveaux produits, par sélection (identification des meilleures alternatives) ou tri (séparation et classement des bonnes alternatives des moins bonnes puis des mauvaises) mais elle est surtout utilisée dans des cas de produits ou services déjà conçus. Elle sert à informer le public sur des produits existants vendus par l'entreprise qui la commande, à évaluer l'adéquation d'un produit avec une catégorie de norme en vigueur et même à élaborer une stratégie politique de grande ampleur.

La définition des objectifs passe ainsi par l'établissement rigoureux de la fonction étudiée. La fonction d'un système est l'action exprimée exclusivement en termes de finalité. Cette étape est surtout nécessaire dans le cas de systèmes présentant des fonctions principales et secondaires, c'est-à-dire des fonctions qui ne font pas toutes parties de l'ensemble étudié.

L'établissement de cette fonction est inévitable dans le cas d'une étude de type comparative, afin d'être en mesure de ramener les flux d'impacts à une même aptitude d'usage. Lorsqu'une étude porte sur une partie d'un système plus large, la comparaison des différentes solutions se rapporte à la fonction globale du système évitant ainsi de fausser les résultats en perdant de vue le service utile final. Nous proposons dans la Table B.1 trois exemples simples de systèmes nécessitant la définition d'une fonction principale et de fonctions secondaires.

Table B.1 – Exemples de fonctions principale et secondaires [JSC05].

Système	Fonction principale	Fonctions secondaires
Paire de souliers	Protéger les pieds	Protection intempéries, protection froid, prestance sociale
Restaurant	Servir des repas	Accueil, socialisation, espaces chauffés
Porte de voiture	Sécurité passager en fonctionnement normal	Sécurité vol, sécurité en cas d'accident, étanchéité

1.2 L'unité fonctionnelle

La définition de l'unité fonctionnelle est le fondement même de l'analyse du cycle de vie car elle précise la grandeur quantifiant la fonction du système. Toutes les données collectées pendant la phase d'inventaire sont rapportées à cette unité fonctionnelle permettant ainsi un écobilan. L'unité fonctionnelle est construite de façon à préciser une quantité de produit, une unité de durée du produit puis un contexte spatial et temporel de performances et de qualité. Ceci permet de mesurer pour chaque processus la quantité de produit de référence (appelé unité de référence) qui remplit la fonction considérée. La comparaison entre plusieurs systèmes doit être faite sur la base d'une même fonction (mesurée par la même unité fonctionnelle) sous la forme d'équivalents d'unités de référence. Ensuite chacun des prototypes se différencie par les flux de matière et énergie ou les co-produits que leur fabrication peut générer en fonction d'autres critères comme l'encombrement, les types de refroidissements, la technologie sélectionnée dans l'élaboration des matières premières, etc. Ainsi l'unité fonctionnelle représente l'unité d'utilité du produit, définie à partir de sa finalité pour l'utilisateur.

Comme il est possible de le constater sur les exemples suivants [Ven97], il apparaît dans les unités fonctionnelles des quantités ou des temps définis uniquement si ceux-ci entrent en jeu dans le service rendu attendu pour le produit considéré. En aucun cas ces unités n'ont de représentativité ni d'incidence sur la comparaison des produits. Toujours du fait de cette référence à un service rendu par le produit et non au produit en lui-même, une unité fonctionnelle ne propose pas d'exigences en termes de durabilité ou de performances. En effet, un produit trop performant pour une unité fonctionnelle donnée sera automatiquement moins performant lors de l'écobilan qui, lui, est indépendant du service rendu. Ce cloisonnement entre impacts environnementaux et service rendu permet une analyse impartiale et complète des produits qui fait un des intérêts de la globalité des analyses sur cycle de vie. Dans le cas des machines électriques, l'unité fonctionnelle commune à chaque prototype peut être, par exemple, de fournir une puissance mécanique sous forme d'un profil couple-vitesse sur un cycle d'utilisation sous alimentation donnée.

Exemple 1 : unité fonctionnelle de comparaison de lessives - Laver un poids donné de linge (constitué de fibres données et sali de manière donnée) dans des conditions jugées satisfaisantes (à savoir en respectant des niveaux d'exigences donnés selon des procédures d'essais pour le lavage et pour la mesure de l'usure du linge données).

Exemple 2 : unité fonctionnelle de comparaison de peintures - Couvrir une surface témoin donnée (constituée d'un matériau donné et préalablement peinte en damier noir et blanc) dans des conditions jugées satisfaisantes (à savoir avec une opacité supérieure ou égale à un seuil donné) et pour une durée donnée.

Ces deux exemples introduisent, par l'intermédiaire de l'unité fonctionnelle, une notion fondamentale dans la conception et plus généralement l'éco-conception de produits innovants. En effet, il n'a jamais été intéressant de sur-dimensionner un produit pour un service rendu donné, en particulier d'un point de vue économique. La définition d'une unité fonctionnelle et le choix optimal d'une structure qui en découlera tend à produire des systèmes uniquement fonctionnels dans le cadre strict de l'unité fonctionnelle et rapidement défectueux si l'utilisation qui en est faite s'en écarte. L'idéal vers lequel tendent les choix conceptuels qui découleront des écobilans est au final un produit qui sera utilisé jusqu'à la durée pour laquelle il est prévu de rester fonctionnel et tombera en défaut à ce moment là, entrant ainsi dans sa filière de mise en dépôt. Il s'agit simplement ici d'un effort social à accomplir dans le sens d'une utilisation des objets consommables jusqu'à leur fin de vie effective et non jusqu'à une limite définie par ce qui peut être qualifié de mode, hors garanties, rendant un objet encore fonctionnel impropre à la consommation et son remplacement souvent automatique. Ces phénomènes de sociétés rarement prévisibles sont de ce fait, malgré des impacts souvent conséquents, difficiles à incorporer dans l'éco-conception, car il s'agit en général d'études prospectives sur plusieurs dizaines d'années. Idéalement, ils devraient faire l'objet d'une éducation spécifique ou d'une prise de conscience sociétale rapide qui est indépendante de l'adoption par l'industrie de critères de conception environnementaux.

1.3 Les limites du système analysé : le champ d'étude

Les analyses sur cycle de vie peuvent être utilisées avec pour but de comparer différentes alternatives (soit plusieurs cycles de vie concurrents, soit plusieurs étapes possibles d'un même cycle de vie) assurant la même fonction afin d'identifier quelle étape du cycle de vie d'un produit est pénalisante. Il faut alors limiter l'étude à une « profondeur » donnée (les analyses sur cycle de vie se présentent souvent comme une arborescence de processus). Ceci se fait sous l'appellation de « frontière d'analyse » ou champ d'étude, qui sera précisée dans la présentation finale des résultats et justifiera la validité de l'inventaire. Le champ de l'étude va directement déterminer son niveau de sophistication, donc sa densité, sa durée et sa fiabilité. Le niveau de détails de l'étude doit bien entendu être compatible avec l'objectif défini et surtout suffisant pour y répondre.

La définition du champ d'étude consiste à cerner complètement le système étudié, incluant les processus liés au produit, service ou procédé considéré. Il faut classifier différents processus, dont un principal qui conditionne l'analyse, ainsi que tous ceux d'arrière plan, dont il est possible de négliger une partie en supposant que leurs impacts sur le bilan final est faible devant celui des principaux procédés ou suffisamment découplé. Le rôle de la frontière est justement de différencier les procédés dont il faut tenir compte (comme la fabrication du produit) de ceux qui peuvent être laissés de côté (comme la construction de l'usine au sein de laquelle le produit transite). Fondamentale vis-à-vis de la portée des conclusions de l'analyse, cette frontière n'est pas fixe au cours d'une analyse suivant l'importance révélée en cours d'étude des différents processus. Elle définit de même des critères d'inclusion ou d'exclusion des entrants et sortants transitant entre le produit considéré et son environnement. Il est en effet rarement possible de comptabiliser l'ensemble des flux traversant l'interface entre l'environnement et le produit au cours de son cycle de vie. Il arrive fréquemment de n'en garder que quelques un, qui doivent être d'une part quantifiables et d'autre part suffisamment représentatifs, ou significatifs, dans l'ensemble des flux mesurés pour être jugés aptes à une amélioration pour l'éco-produit. Le choix du champ d'étude joue aussi un rôle significatif dans l'éco-conception. Par l'intermédiaire de cette limite, qui exclut des impacts sur lesquels une optimisation ne pourra pas jouer, décrétant ainsi qu'ils ne sauraient représenter des critères de conception viables.

Dans l'analyse sur cycle de vie, le choix du champ d'étude reste relativement empirique. Un choix arbitraire étant exclu, il existe plusieurs méthodes pour mettre en place ces frontières [Ben98]. De même, il a été proposé un certain nombre de règles d'imputations, utiles lorsqu'il faut répartir les entrants et sortants du système étudié entre les processus inclus et exclus de l'étude afin de ne pas pénaliser le système analysé par des impacts dont il n'est pas originaire. De façon pragmatique, la normalisation ISO préconise d'éviter toute imputation, de lister de manière itérative les entrants et sortants pendant la définition du champ d'étude et de ne retenir que les flux dont la contribution à certains critères par rapport aux quantités cumulées sur tout un cycle est supérieure à un seuil fixé.

La définition des limites du système peut faire basculer les résultats d'un écobilan en faveur d'un produit ou un autre. Il convient donc d'être très prudent quand à leur établissement, en respectant certaines règles simples mais indispensables à la bonne conduite d'une analyse sur cycle de vie [JSC05]. Tout d'abord, si l'analyse est utilisée à une fin comparative, les limites du système doivent recouvrir la même réalité fonctionnelle dans les différents scénarios. D'autre part, les processus qui contribuent à la hauteur d'un certain pourcentage de la masse des entrants, de la consommation énergétique ou de l'émission d'un polluant doivent être retenus. Ce pourcentage est fixé en début d'étude, par exemple à quelques pour cents. Et enfin, les étapes identiques dans les différents scénarios peuvent être éliminées de l'analyse à condition que les flux de référence affectés par ces processus soient strictement égaux (sortant totaux du système identiques). Il n'est en effet pas raisonnable de négliger une étape qui a une influence sur certains flux de référence, même si elle se retrouve dans tous les scénarios envisagés.

2. Réalisation de l'inventaire

Un inventaire de cycle de vie identifie et quantifie les flux de matière et d'énergie entrant et sortant du système fermé défini par la frontière d'analyse, établie lors de l'étape précédente de l'analyse sur cycle de vie du système. Cet inventaire regroupe les quantités de substances polluantes émises ainsi que les ressources extraites au cours du cycle de vie du produit analysé. Il apparaît que des erreurs inhérentes à l'élaboration des bilans internes à l'inventaire vont non seulement exister, mais devoir être qualifiées. Afin d'éviter les analyses trop grossières, la réalisation de ces bilans exige une description détaillée des systèmes étudiés (nature du procédé, paramètre de fonctionnement, etc.). Les entrants (matières premières et énergie) et les sortants (produit, co-produit, rejets dans l'air et l'eau et déchets solides) sont comptabilisés pour tout ou partie du cycle de vie étudié selon les choix établis par l'objectif et les restrictions imposées par le champ d'étude.

2.1 Une démarche exhaustive

La réalisation d'un inventaire est la seconde phase d'une analyse sur cycle de vie. Nous explicitons à la Figure B.1 l'ensemble des interactions possibles entre le processus étudié sur une étape de son cycle de vie donnée et l'extérieur. L'extérieur représente tout ce qui n'est pas inclus dans le champ d'analyse. Il s'agit généralement de l'environnement, mais cela peut aussi inclure la santé humaine, l'environnement sonore, etc.

Il faut collecter lors de cet inventaire les données pertinentes sur les flux croisant les frontières définies lors de la définition du champ d'étude, valider ces données reçues ou mesurées et les relier aux systèmes spécifiés sur chaque étape du cycle de vie. Il s'agit d'une phase plus fastidieuse que complexe, les choix cruciaux ayant été fait lors de la

définition des objectifs. Notons que les flux élémentaires peuvent souvent être calculés à partir du bilan de masse du produit étudié et de bases de données regroupant les résultats d'analyses sur cycle de vie précédemment menées. Une utilisation judicieuse mais raisonnée de bases de données d'inventaires de cycle de vie évite de mener à nouveau des travaux déjà accomplis et minimise les efforts de mesure qui deviennent rapidement titanesques pour une analyse complète.

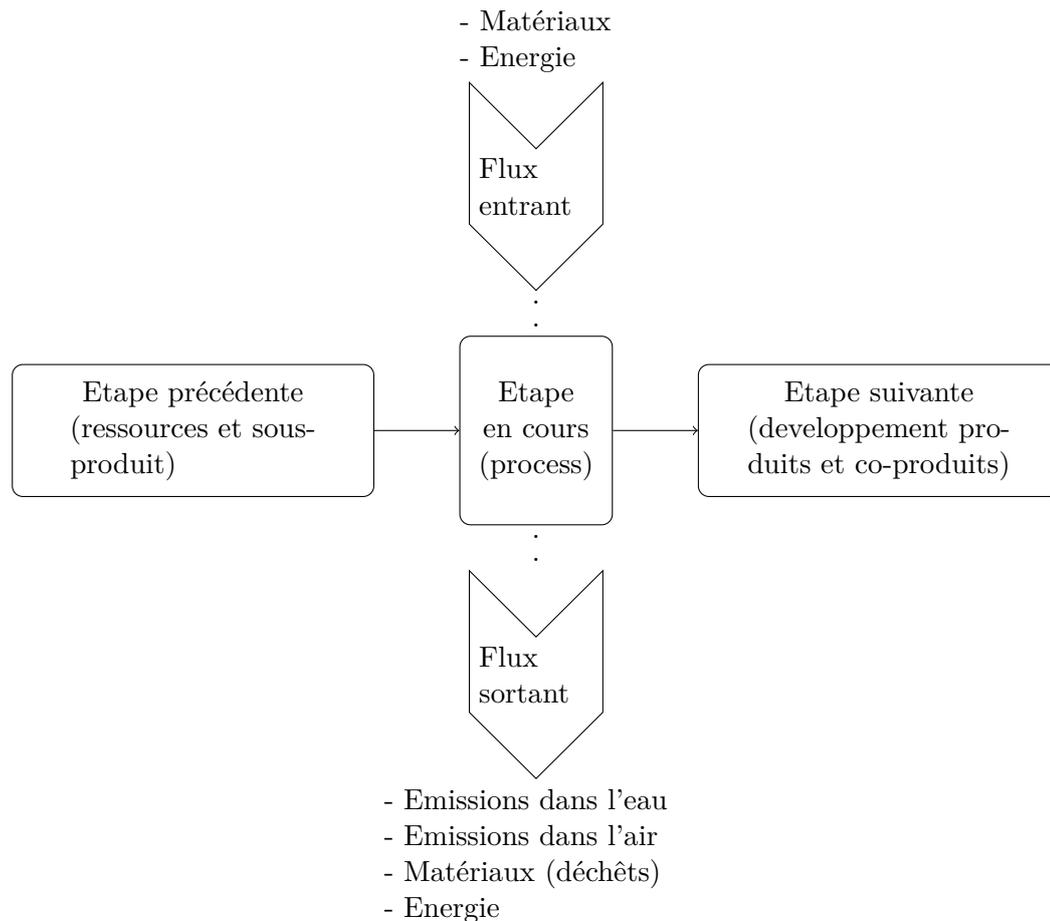


Figure B.1 – Liste des échanges possibles entre un produit et son environnement au cours d'une étape de son cycle de vie [JEC⁺02].

Les processus polluants interviennent en général à différents moments et en différents lieux du cycle de vie du produit étudié. Il est alors intéressant d'avoir recours à l'agrégation des informations concernant les substances identiques ou les émissions occasionnant les mêmes impacts. Cette agrégation peut se faire sous l'hypothèse que l'impact d'une substance est lié à ses propriétés physiques intrinsèques et non à son mode d'émission. Ainsi, l'ensemble des impacts environnementaux sont rassemblés en un nombre limité de catégories permettant une interprétation plus aisée des résultats d'analyse. Cette repré-

sentation, couramment utilisée en éco-conception, permet de regrouper tous les impacts environnementaux identiques d'un produit mais supprime la notion d'étape du cycle de vie. En effet, il n'est plus possible dans ce cas de figure de déterminer qu'elle étape du cycle de vie est la plus néfaste à l'environnement.

A titre d'exemple, la Table B.2 et la Table B.3 présentent les entrants et sortants associés à la fonction « production d'une tonne de cuivre ». Ces données datent de 1992 et ont été mesurées en Allemagne. Nous pouvons constater à la vue de ces tableaux que la mise en place d'un tel inventaire est d'autant plus longue qu'elle est complète. La qualité des données n'apparaît que si un effort significatif est consenti dans ce sens, entraînant par là une complexification supplémentaire de leur représentation.

Table B.2 – Flux engendrés par la production d'une tonne de cuivre à partir de concentré et de ferraille, Allemagne 1992. Les moyennes sont calculées sur des échantillons composés à partir de 2130 kg de concentrés et 570 kg de ferraille. Les concentrés ont pour composition Cu (30 %), Fe (26 %), S (32 %), Zn (1,5 %), SiO₂ (0,2 %), As (0,1 %), Al₂O₃, CaO et MgO (3 %), autres métaux lourds (<0,2 %) [AAR02].

Flux entrants et sortants	Total
Energie primaire	21,8 GJ
Matière première	2700 kg
Eau	-
Emissions	
Fumées	16000 m ³
Poussière	0,425 kg
SO ₂	4,75 kg
NO _x	3,93 kg
CO	1,08 kg
HC	0,71 kg
CO ₂	1390 kg
Déchets solides	
Boue acidifiée	<1 kg
Dépôt d'arsenic	2 kg
Cendres	30 kg
plâtre	<10 kg
Déchets liquides	
Rejet d'eau	~ 1 m ³
Co-produits commercialisables	
Scories	1120 kg
H ₂ SO ₄	1880 kg
Boue d'anode	10 kg
NiSO ₄	10 kg

Table B.3 – Flux engendrés par la production d'une tonne de cuivre à partir de matériaux de seconde main, Allemagne 1992. Les moyennes sont calculées sur des échantillons composés à partir de 1040 kg de ferraille et 580 kg d'autres matières de secondes mains [AAR02].

Flux entrants et sortants	Total
Energie primaire	20,55 GJ
Matière première	1620 kg
Eau	-
Emissions	
Fumées	32000 m ³
Poussière	0,31 kg
SO ₂	4,32 kg
NO _x	3,20 kg
CO	3,52 kg
HC	0,23 kg
CO ₂	1,96 kg
Déchets solides	
Cendres	<20 kg
plâtre	<10 kg
Déchets liquides	
Rejet d'eau	<1 m ³
Co-produits commercialisables	
Scories	530 kg
Cendres volantes	120 kg
Boue d'anode	10 kg
NiSO ₄	20 kg

2.2 Bases de données d'inventaires de cycle de vie

Afin de faciliter la connexion entre les processus étudiés et les flux élémentaires, il est possible de chercher des données d'inventaires auprès d'industriels, d'organismes spécialisés ou dans la littérature. Ceci évite de recommencer un travail déjà exécuté et la plupart du temps techniquement hors de portée, mais présente le défaut de n'être pas toujours de la minutie désirée par le niveau de complexité de l'étude en cours. L'obtention de données fiables, clairement répertoriées et régulièrement mises à jour par un organisme compétent (notamment qui est en mesure d'appréhender ce qu'il quantifie et distribue!) n'est pas chose facile et peut rendre l'application de l'analyse sur cycle de vie délicate, particulièrement dans les domaines trop pointus pour avoir été traités avec la rigueur qui convient.

Il existe toutefois à travers le monde un certain nombre de bases de données d'inventaire d'analyse sur cycle de vie accessibles au public moyennant un abonnement forfaitaire ou d'autres types d'arrangements financiers. Celles-ci ont été répertoriées et sont désormais classées et mises à jour dans le cadre de l'Initiative pour le Cycle de Vie du programme de la SETAC et du PNUE. Leurs travaux sont disponibles sur Internet [BDD]. Ces bases de données sont la plupart du temps construites suite à des études d'analyse du cycle de vie de grandes catégories de produit. Ainsi les bases de données, validées pour un certain nombre d'années, peuvent être découpées en grands secteurs, souvent en corrélations avec les domaines techniques qui les utilisent. Ceci implique malheureusement une répartition mondiale des bases de données globalement diversifiée et fragmentaire. Cet état de fait est en cours d'harmonisation, par l'intermédiaire d'une normalisation adéquate [ISO02a]. Quelques unes des principales bases de données d'inventaire d'analyse sur cycle de vie sont regroupées dans la Table B.4. Nous en proposons de plus un extrait plus spécifique au Génie Electrique en Annexe A, page 197.

Table B.4 – Liste des principales bases de données d'inventaires de cycle de vie [BDD].

Base de donnée	Fournisseur	Langue
DEAM	Ecobilan - PricewaterhouseCoopers	Anglais
Ecoinvent Data	Ecoinvent Centre	Japonais et Anglais
EIME	CODDE	Espagnol, Français et Anglais
Gabi databases 2006	PE International GmbH	Japonais, Allemand et Anglais
SimaPro Database	PRé Consultants B.V.	Anglais
US Life Cycle Inventory Database	Athena Sustainable Materials Institute	Anglais

2.3 Qualité des données de l'inventaire

Naturellement, la qualité des données utilisées dans un inventaire d'analyse sur cycle de vie se répercute directement sur la véracité et surtout la fiabilité du résultat final. La qualité des bases de données peut être décrite et analysée de différentes façons, mais dans tous les cas doit figurer dans l'étude proprement dite, afin de proposer des résultats contrôlables. La qualité des données requises s'établit selon des paramètres importants, regroupés ci-dessous.

La portée temporelle - Précise l'âge des mesures (par exemple moins de 2 ans) et le temps minimum de validité de la mesure (par exemple annuel).

La portée géographique - Précise si les mesures sont locales, régionales, nationales, continentales ou même mondiales. Cette aire variable concerne la plupart du temps

directement l'unité fonctionnelle. Le choix géographique est fondamentalement lié aux objectifs et champ d'étude du produit en cours d'analyse. Il ne faudra pas garder les mêmes mesures pour une étude sur une production locale ou pour une autre concernant un système étendu à plusieurs pays. Cela joue par exemple sur le mix énergétique, sur la disponibilité des produits sous une certaine distance de transport, sur les valeurs d'impacts environnementaux (se référer par exemple à la Table B.5 la variation du coût énergétique de production de l'acier à partir de fonte ou ferrailles suivant le pays), etc.

La portée technologique - Précise les technologies de mesures qui vont entrer naturellement en compte dans la qualité des données. Il convient de connaître leur précision, leur exactitude et si cette technologie est la plus adaptée pour ce genre de mesures, dans ces conditions de mesures.

La précision - Donne par exemple un chiffre comme la variance, proposant une idée de la variation des valeurs pour chaque catégorie de données.

La complétude - Précise le pourcentage de données effectivement acquises sur l'ensemble des données potentiellement mesurables.

La représentativité - Analyse qualitativement les données afin d'assurer que les mesures reflètent une grande partie de la population d'intérêt.

La cohérence - Montre si l'ensemble des données récoltées présentent une certaine uniformité selon les trois grands critères présentés plus haut.

La reproductivité - Vérifie qu'en théorie, toute personne amenée à lire les résultats des mesures doit pouvoir effectuer à nouveau ces mêmes mesures.

Notons que les trois premiers paramètres présentés ci-dessus sont fondamentaux dans le sens où leur connaissance est une condition nécessaire à l'établissement de la qualité véritable des données d'un inventaire sur cycle de vie. Les cinq derniers critères permettent une étude vraiment exhaustive sans pour autant être absolument indispensables [JSC05].

La qualité des données, bien que difficile à quantifier, doit impérativement être considérée avec soin afin de garantir la crédibilité de l'analyse du cycle de vie. En effet, si l'incertitude totale des résultats en arrive à être supérieure à la différence entre les impacts des scénarios considérés, il en résultera un jugement erroné lors de l'écobilan. Il existe plusieurs indicateurs de qualité [WW96], qui pondèrent par exemple les données par un coefficient ou par une note comprise entre 1 et 5. Les indicateurs considèrent principalement les points suivants :

- la fiabilité des données découle de la méthode de mesure utilisée et des procédures de vérification,
- l'exhaustivité dépend du nombre d'entreprises considérées sur une période de temps donnée,
- les corrélations géographiques, temporelles et technologiques indiquent si les données utilisées couvrent le lieu, la période et la technologie du processus étudié,
- la taille de l'échantillon souligne la représentativité de l'échantillon.

Nous entrons ici dans le domaine de la statistique en ce qui concerne la gestion des mesures, mais aussi dans la dispersion des technologies d'un pays à un autre en ce qui concerne la mesure des impacts environnementaux pour un résultat identique. A titre d'exemple, nous proposons dans la Table B.5 les coûts énergétiques nécessaires à la production d'un kilogramme d'acier à partir de fonte ou ferrailles en 1995 dans différents pays de par le monde. Notons que les consommations énergétiques varient du simple au double. Pour pallier ce problème lors d'une production multi-nationale, nous pouvons envisager des moyennes pondérées de coûts à l'échelle de nations ou de régions dans lesquels sont situés les sites de production. Notons qu'il fait partie du travail d'éco-conception de quantifier la sensibilité du produit éco-conçu à ses coûts environnementaux élémentaires.

Table B.5 – *Consommation énergétique pour la production d'un kilogramme d'acier à partir de fonte ou ferrailles dans différents pays en 1995 [Mih01].*

Pays	Energie primaire, kWh	Rapport avec les Etats-Unis
Etats-Unis	2,5	1
Allemagne	4,2	1,68
Suède	4,2	1,68
France	5	2
République Tchèque	5,3	2,12
Hongrie	5,5	2,2
Pologne	5,8	2,32
Bulgarie	5,8	2,32
Slovaquie	5,8	2,32
Roumanie	6,7	2,44

Enfin nous proposons dans la Table B.6 le descriptif d'indicateurs de qualité qualitatifs utilisés pour estimer le bien fondé de données regroupées dans les bases de données d'un inventaire de cycle de vie.

Table B.6 – Matrice avec 5 indicateurs de qualité de données [JSC05].

Score de qualité	Corrélation temporelle	Corrélation géographique	Corrélation technologique	Exhaustivité	Fiabilité	Taille échantillon
1	Moins de 3 ans de différence avec l'année d'étude	Données de la zone d'étude	Données d'entreprises, de processus et de matériaux à l'étude	Données représentatives d'un échantillon suffisant d'entreprises sur une période adéquate	Données vérifiées basées sur des mesures	>100 mesures ou mesures continues
2	Moins de 6 ans de différence avec l'année d'étude	Données moyennes d'une zone plus large dans laquelle la zone d'étude est incluse	Données de processus et matériaux à l'étude mais de différentes entreprises	Données représentatives d'un petit nombre d'entreprises mais pour des périodes adéquates	Données vérifiées partiellement basées sur des hypothèses ou données non vérifiées basées sur des mesures	>20 mesures
3	Moins de 10 ans de différence avec l'année d'étude	Données d'une zone ayant des conditions similaires	Données de processus et matériaux à l'étude mais de différentes technologies	Données représentatives pour un nombre adéquat d'entreprises mais pour des périodes plus courtes	Données non vérifiées partiellement basées sur des hypothèses	>10 mesures
4	Moins de 15 ans de différence avec l'année d'étude	Données d'une zone ayant des conditions légèrement similaires	Données sur processus ou matériaux relatifs mais de technologies identiques	Données représentatives mais pour un petit nombre d'entreprises et pour des courtes périodes ou données incomplètes pour un nombre adéquat d'entreprises et périodes	Estimation qualifiée (par exemple par un expert industriel)	≥3 mesures
5	Age des données inconnu ou plus de 15 ans de différence avec l'année d'étude	Données d'une zone inconnue ou zone avec des conditions de production très différentes	Données sur processus ou matériaux relatifs mais de technologies différentes	Représentativité inconnue ou données incomplètes provenant d'un petit nombre d'entreprises et/ou pour des périodes plus courtes	Estimation non qualifiée	inconnue

2.4 Co-produits et affectation

L'analyse du cycle de vie s'intéresse généralement à un seul produit. Cependant, il est fréquent que les procédés industriels soient des systèmes à produits multiples. Il est nécessaire dans ce cas d'affecter les charges environnementales et l'utilisation des matières premières entre le produit étudié et les co-produits. Lors des transports aussi, il est tout à fait possible d'entasser dans les containers un grand nombre de composants autres que ceux concernant l'étude. D'autre part, certains co-produits de ces procédés possèdent une valeur marchande, ce qui n'est pas le cas de tous, etc. Ce principe s'applique non seulement aux co-produits, mais aussi aux déchets à éliminer ou valoriser. En effet, une part des déchets recyclés peuvent être réutilisés non seulement dans le cadre du produit dont le cycle de vie est analysé (recyclage en boucle fermée), mais aussi dans la fabrication de systèmes extérieurs (recyclage en boucle ouverte) rendant ainsi l'affectation des flux encore plus complexe (il faut par exemple prendre en compte le nombre de réutilisations successives du produit).

Ainsi une étude mal conduite, notamment dont les affectations et la définition des co-produits n'est pas correctement comptabilisée peut mener à tout et son contraire. A terme, l'analyse sur cycle de vie risque même d'être décrédibilisé dans l'opinion publique du fait de résultats contradictoires exhibés par une industrie et ses opposants. Afin d'éviter cet effet, différentes méthodes ont été proposées et discutées. Par mesure de précaution, les normes ISO définissent une hiérarchie prudente entre les différentes règles d'affectations.

1. Eviter l'affectation par subdivision des processus ou au contraire par extension du système aux co-produits.
2. Affectation suivant une propriété représentant la causalité physique ou par déterminée de variations marginales (c'est-à-dire par le principe mathématique du calcul de variation infinitésimal).
3. Affectation financière ou fonctionnelle dans le cas de produits assurant la même fonction.

3. Analyse des impacts environnementaux

La notion d'impact implique l'action d'un système source sur un système cible. Le changement d'état intervenant suite à cette action doit être quantifié de la façon la plus juste possible, ce qui s'effectue a priori de manière relativement simple, mais représente en pratique un labeur considérable. En effet, les impacts apparaissent souvent sous la forme d'une succession d'impacts dits secondaires et ces effets successifs ne sont pas toujours dirigés sur la même cible : une même substance rejetée dans l'atmosphère peut avoir plusieurs effets différents, certains considérés comme mauvais et d'autres comme neutres. Il faut dans un premier temps établir une liste pertinente de catégories d'impacts à prendre

en compte (avec l'aide du travail effectué lors de l'établissement du champ d'étude) puis répartir chaque flux de l'inventaire réalisé précédemment dans ces catégories. Les différentes catégories d'impacts choisies doivent assurer une cohérence avec les objectifs de l'étude, doivent être référencées et justifiées. Un produit est susceptible d'avoir trois grandes catégories d'impacts environnementaux au cours de son cycle de vie.

Les effets sur le milieu physique local - Regroupent les modifications de propriétés physico-chimiques d'un lieu environnant le produit lors de l'étape considérée du cycle de vie (l'épuisement des ressources entre dans cette catégorie). Par exemple, les sites d'implantation de centrales nucléaires nécessitent des mesures de réhabilitation lors de leur démantèlement : il y a eu clairement altération du milieu physique lors de la fonction « création d'électricité ».

Les effets sur le milieu vivant - Comprennent notamment la toxicité. Cela concerne en général l'organisme humain, mais peut tout à fait s'étendre au monde animal, comme par exemple la faune locale dans une rivière où se pratiquent des rejets, etc.

Les effets sur les écosystèmes - Sont plus globaux et présentent les perturbations de l'équilibre écologique sur une échelle large qui peut aller de la région à la planète. Les trous dans la couche d'ozone entrent dans cette catégorie.

Cette troisième phase de l'analyse sur cycle de vie possède un ascendant sévère sur les résultats de par ses décisions discrétionnaires. Elle consiste en une traduction appropriée et explicite des flux de matière et d'énergie recensés au cours de l'inventaire en termes d'impacts au sein de familles typiques. Il faut dès lors se montrer à même de comparer ces différentes catégories d'impacts, afin de privilégier le produit qui aura au final l'interaction la plus faible avec l'environnement. La multiplication des catégories d'impacts rend cette étape rapidement impraticable avec une rigueur et une impartialité totales. Devant la diversité des catégories présentes et parfois l'antinomie des unités de quantifications, nous pourrions même être amené à préférer comparer les différents résultats directement sur la base du seul inventaire sur cycle de vie, dans lesquels une pondération implicite est réalisée en attribuant le même poids à chacun des polluants.

Il n'existe pas de méthode de référence permettant la pondération des impacts listés dans l'inventaire d'analyse sur cycle de vie. Les méthodes d'évaluation des impacts potentiels dans les analyses sur cycle de vie se réalisent en assignant les résultats d'inventaires à des classes d'impacts normalisées.

1. La classification des impacts, assignés à des catégories d'impacts.
2. La caractérisation des impacts au sein des indicateurs de catégories.
3. L'évaluation et la comparaison des impacts selon des catégories de dommages.

3.1 Différentes catégories d'impact

A titre d'exemple, nous donnons à la Figure B.2 les catégories d'impacts principalement retenues dans la plupart des éco-indicateurs et décrites dans le cadre méthodologique fixé par l'Initiative pour le Cycle de Vie de la SETAC et du PNUE [LCI]. Cette catégorisation provient de la méthode Impacts 2002+ développée au sein de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne [JMC⁺03].

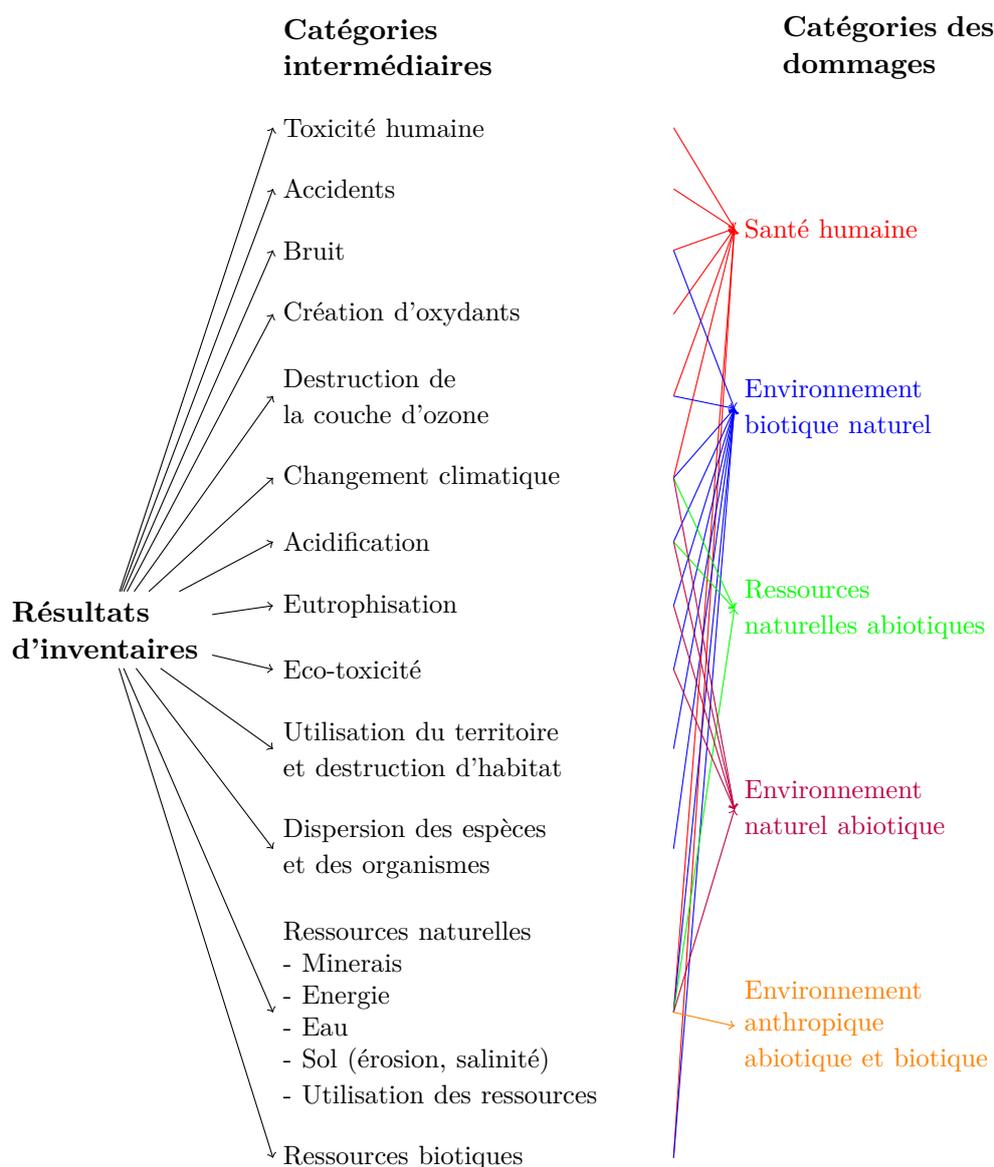


Figure B.2 – Exemple de structure d'analyse des impacts d'un produit sur son cycle de vie [JMC⁺03].

La classification dans chacune des catégories se fait en fonction de la similitude des effets sur l'environnement des substances quantifiées. Chacune des catégories dites intermédiaires se subdivise en sous-catégories précisant leur propos. Pour chaque impact une méthode différente de quantification du type d'effet concerné est mise en place, acceptée en général par consensus scientifique puis normalisée. Enfin ces catégories intermédiaires sont affectées à un certain nombre de catégories de dommages, considérant cette fois-ci non plus les impacts environnementaux, mais les sujets à protéger (santé humaine, écosystème, etc.). Notons que suivant l'objectif de l'étude, notamment pour quelle audience elle est destinée, il est possible de s'arrêter aux catégories intermédiaires ou au contraire de continuer jusqu'aux catégories de dommages, de simplifier ou même de compléter ces listes. Les méthodes de pondérations proposent un large panel de ces différents choix et même souvent plusieurs possibilités de catégorisation.

Ces deux catégories possèdent des indicateurs pondérant chaque impact selon l'importance qui lui est propre dans la méthodologie de classification privilégiée. Il est fait appel pour cela à des facteurs de caractérisation (intermédiaires ou de dommages, *mid-point* ou *end-point* en anglais) qui expriment l'importance relative des émissions (ou de l'extraction) des substances selon la catégorie d'impact dans lequel elles se situent. Ces facteurs sont appliqués aux masses émises ou extraites puis sommés pour fournir un score d'impact (intermédiaire ou de dommage). Les impacts sont ainsi agrégés et exprimés par exemple en kilogrammes équivalent d'une substance de référence (par exemple les gaz à effet de serre sont ramenés à une unité d'émission équivalente de CO₂). Enfin les résultats peuvent être normalisés et même pondérés de nouveaux pour répondre à des critères sociaux, politiques ou même éthiques.

Cette catégorisation naturelle mais toutefois empirique cache le problème majeur rencontré lors de la classification, de la quantification et surtout de l'analyse des impacts. Celui-ci provient du fait que certains rejets provoquent plusieurs types d'effets sur l'environnement répartis selon des catégories différentes. Dès lors, quelle prépondérance donner à une catégorie plutôt qu'à une autre, sous quel pourcentage du rejet, en masse ou en volume, etc. Les questionnements deviennent vite nombreux. De plus, il s'agit bien souvent de catégories d'impacts dont les quantifications n'ont rien en commun et dont la comparaison ne peut se faire que sur la base de normalisations arbitraires. Encore une fois, il existe plusieurs possibilités de catégorisations, chacune ayant ses spécificités liées en général à l'appréciation la plus juste d'un domaine technique particulier. Ainsi la répartition des impacts selon ces catégories n'est pas la même selon qu'il s'agit d'estimer les impacts environnementaux d'une industrie pétrolière et d'une production hydraulique d'électricité.

3.2 Caractérisation des impacts de l'inventaire

Pour chaque catégorie d'impact environnemental, il faut sommer la contribution de chaque flux et agréger l'ensemble des contributions par classes. Comparer ces différents

impacts implique le choix d'une unité commune. Notons qu'elle sera moins nécessaire dans le cas d'une méthode d'analyse multi-objectifs (il suffit alors d'unités communes à chacune des classes d'impacts choisies comme critères d'optimisation). Pour cela, le choix d'un indicateur d'impact est obligatoire. Celui-ci permet de quantifier la contribution spécifique de chaque flux dans une unité standardisée. Cette évaluation se fait grâce aux éco-indicateurs. Leur choix est motivé par le type d'étude menée notamment par l'incertitude tolérée sur les résultats. Nous pouvons répartir ces méthodes en trois groupes [Kha98].

1. Les impacts ayant trait aux émissions pondérées dans les milieux de l'environnement.
2. Les impacts se rapportant aux catégories d'impacts.
3. Les impacts se limitant à des indices de l'inventaire ou écologique (éco-points).

En général, les analyses sur cycle de vie se limitent aux méthodes *mid-point*. Il est toujours possible dans un second temps de calculer des résultats *end-points*. Il s'agit d'évaluer l'impact des flux d'un produit sur l'environnement. Le terme générique d'environnement peut prendre de nombreuses significations. Ainsi des modèles scientifiques sont conçus pour prendre en compte les atteintes locales, régionales ou globales sur des échelles de temps variable. Ces modèles fournissent à la fois des indicateurs d'impacts sur l'environnement et les coefficients de pondération associés. Nous avons :

$$\text{Valeur de l'impact environnemental} = \sum \text{Flux} * \text{Coefficients de pondération} \quad (\text{B.1})$$

En général l'indicateur d'impact environnemental est exprimé dans une unité spécifique, un coefficient de pondération permet de ramener chaque flux ayant une influence sur l'indicateur à cette unité de référence. Ce coefficient de pondération retranscrit le fait que chaque flux a une durée de vie différente, une intensité d'effet variable, etc.

Par exemple, dans le cas du potentiel de réchauffement global, le coefficient de pondération du Méthane CH_4 est de 23 à l'horizon de 100 ans. Cela signifie que si le processus considéré relâche 1 kg de CO_2 et 1 kg de CH_4 , l'impact sur l'effet de serre additionnel est de 24 kg de CO_2 équivalent. En d'autre terme, sur une durée de cent ans, une masse de méthane est 23 fois plus efficace pour piéger le rayonnement infrarouge qui cause l'effet de serre qu'une masse égale de dioxyde de carbone.

Il existe de nombreux modèles de catégorisation des impacts environnementaux, établis par des centres de recherches ou des groupes d'experts internationaux. Chaque modèle contient les équivalents en impacts environnementaux « de base » pour chacune des substances répertoriées dans leur base de données, établissant un référentiel écologique pour la classification des produits. Une liste non exhaustive de méthodes d'impacts est proposée ci-dessous.

- CML (Université de Leiden) [CML].
- Impact 2002+ (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) [JMC+03].
- Eco-indicator 95 puis Eco-indicator 99 (Product Ecology Consultants) [EIn01].
- EDIP 1997 puis EDIP 2003 (Agence Danoise de Protection de l'Environnement) [EDI04].
- EPS 2000 (Université des Technologies de Chalmers) [EPS01].

3.3 Exemple de méthodes d'analyse des impacts environnementaux

L'analyse des impacts environnementaux se fait par l'intermédiaire d'indicateurs. Le choix de ces derniers est motivé par le type d'étude menée et par les incertitudes qui y sont tolérées. Deux des principales méthodes sont présentées ici afin de rendre compte de l'impact de leur choix sur les résultats finaux [Kha98]. Nous pouvons répartir ces méthodes en trois groupes :

- les méthodes ayant trait aux émissions pondérées dans les milieux,
- les méthodes se rapportant aux catégories d'impacts,
- les méthodes se limitant à des indices de l'inventaire comme l'intensité de matière ou à un indice écologique comme les éco-points.

Il existe différentes méthodes et logiciels informatiques pour hiérarchiser les impacts environnementaux des produits [VP01].

EPS, Suède - Air, eau, espace utilisé, ressources en métaux et énergie non renouvelables.

Eco-points, Suisse - Air, eau, énergie et déchets.

Eco-indicateurs, Pays-bas - Effet de serre, ozone, eutrophisation, brouillards d'été et d'hiver, pesticides, métaux lourds dans l'air et l'eau, substances cancérigènes.

EIME, France - Energie, effet de serre, déchets en fin de vie, en fabrication, toxicité (initialement destiné aux industries électriques).

TEAM, SIMAPRO, Pays-bas - Permet de sélectionner les impacts à étudier, les bases de données et les méthodes de calcul.

Le problème principal, une fois passé le critère de disponibilité et d'achat, est d'adapter la mesure des moyens aux objectifs. Au final les impacts environnementaux les plus souvent retenus sont les suivants [VP01] :

- énergie, contenu énergétique, éventuellement non renouvelable,
- matière, consommation de matière non renouvelable,
- effet de serre, participation au réchauffement terrestre,
- acidification, pluies acides, airs, sols,
- appauvrissement de la couche d'ozone,

- émissions d'oxydants, ozone troposphérique liée aux COV, NO_x,
- émissions de poussières et de SO₂,
- toxicité humaine,
- éco-toxicité,
- eutrophisation.

A titre d'exemple, nous présentons ici deux des principales méthodes, afin de mettre en évidence la relation entre les impacts et leur catégorisation.

3.3.1 Méthode des éco-points

Cette méthode intègre une dimension monétaire. Tous les impacts sont transformés en coûts qu'une entreprise est prête à payer pour les « réparer ». Cette méthode a été développée par le Swedish Environmental Research Institute [SER] pour la société Volvo. Son principe est résumé à la Figure B.3. Les différents dommages sont exprimés en valeurs monétaires en suivant les trois principes suivants :

- l'épuisement des ressources naturelles est évalué par le coût futur de l'extraction des matières premières (qui croît donc exponentiellement !),
- les pertes de production sont calculées directement à partir des estimations sur la réduction de la production agricole et des dommages industriels,
- les trois autres domaines de protection sont évalués sur la base du consentement à payer.

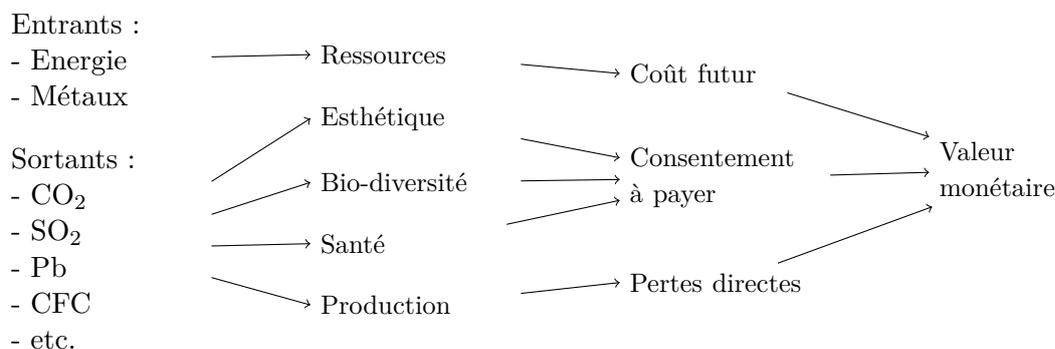


Figure B.3 – Principe de la méthode des éco-points [EPS99].

A tout cela se rajoutent des indices différents pour la matière première et les émissions, qui apportent une analyse des sensibilités de l'étude par l'intermédiaire de facteurs de pondérations. Ceux-ci prennent en compte la rareté des ressources et leur disponibilité théorique (pour les matières premières) et six facteurs pour les émissions (possibilité d'éviter l'effet, fréquence et intensité de l'effet, distribution géographique, population atteinte, durée, coût de l'émission).

3.3.2 Méthode des éco-indicateurs

Elle a été élaborée dans l'intention de fournir un cadre d'évaluation des impacts adapté à l'échelle européenne. Certaines catégories ont donc été exclues, comme l'épuisement des ressources, la production de déchets ultimes, les impacts locaux en général (toxique, bruits, etc.). Il s'agit d'une méthode d'analyse sur cycle de vie orientée dommages.

Le principe présenté à la Figure B.4 aboutit à une valeur d'agrégation dans ce cas indicative et non monétaire. Elle prend cependant en compte un nombre élevé de pondérations, au choix de l'utilisateur suivant la version de l'indicateur que celui-ci utilise, ainsi que le type d'étude et d'objectif qui est fixé.

4. Interprétation des résultats

Une synthèse des bilans d'évaluation exploite de façon raisonnée et répond au mieux aux objectifs ainsi qu'aux limitations du champ d'étude. Il s'agit lors de cette dernière étape de l'analyse sur cycle de vie :

- d'identifier les problèmes environnementaux significatifs,
- d'évaluer la méthodologie et les résultats au niveau de leur fiabilité, crédibilité et représentativité,
- de conclure et de vérifier que les recommandations ainsi obtenues s'ajustent correctement avec les objectifs de l'étude, en particulier la qualité des données ainsi que la consistance des valeurs obtenues.

Cette étape, décrite assez succinctement n'en est pas moins fondamentale dans le processus d'analyse sur cycle de vie. C'est elle qui va donner le point final à l'étude ou lui faire recommencer certaines phases si nécessaire. L'analyse du cycle de vie peut être vue comme une démarche itérative. Il peut être envisagé dans la phase d'interprétation de modifier le champ ou les objectifs d'étude lorsque des informations supplémentaires sont recueillies. Le but de l'interprétation est de réduire le nombre de données quantifiées, de déclarations dans l'inventaire et d'analyses d'impacts dans le résultat final afin de faciliter la prise de décision qui dépend de l'analyse sur cycle de vie. Cette réduction doit se montrer robuste à l'incertitude sur la valeur des données, ainsi qu'à la méthodologie appliquée et donner des valeurs moyennes correctes et représentatives.

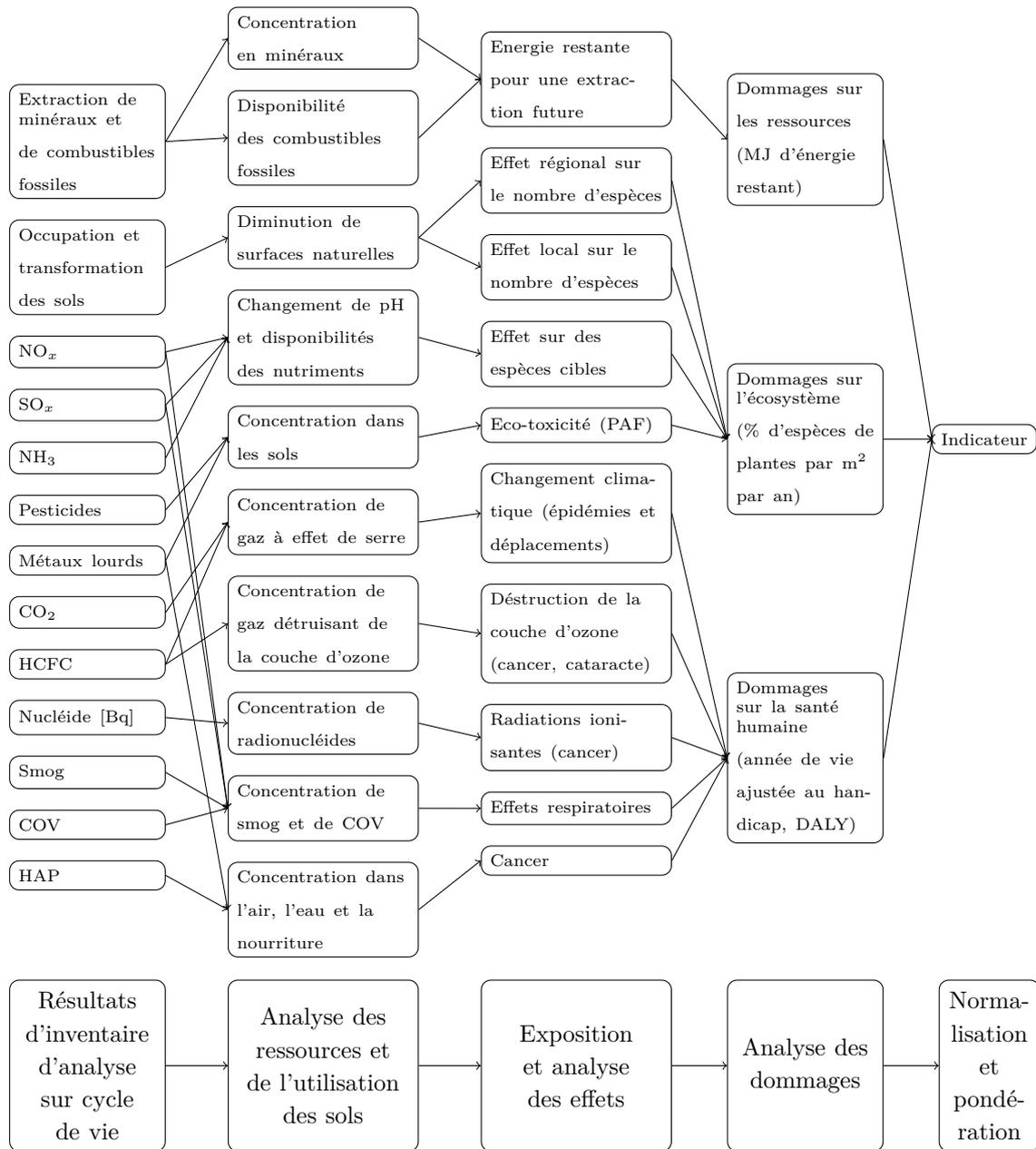


Figure B.4 – Principe de la méthode des éco-indicateurs [Eln01].

L'objectif final d'une analyse sur cycle de vie est d'étudier les possibilités de réduction de l'impact environnemental et d'en dégager les priorités d'action. Ceci peut mener à des situations conflictuelles entre intérêt environnemental et intérêt économique d'une action sur le système étudié. Cette différence apparaît suite à la distinction entre l'étape de fonctionnement (qui représente en général le plus gros des investissements de l'entreprise en termes d'optimisation) et les étapes du cycle de vie situées en amont et en aval (qui peuvent représenter la majorité de l'impact environnemental du produit). Les différents points à faire figurer dans une étude complète sont les suivants :

- la fonction du système ou les systèmes en eux-mêmes, dans le cas d'une étude comparative,
- l'unité fonctionnelle,
- les frontières du système étudié,
- les procédures d'affectation,
- les types d'impacts et la méthode d'analyse de ces impacts ainsi que le moyen d'interprétation,
- les bases de données requises,
- la qualité initiale des données requises,
- les contrôles possibles s'ils existent (contrôles ISO par exemple),
- le type et le format du rapport requis pour l'étude.

Données de calculs

Nous donnons dans ce qui suit les données physiques utilisées dans les optimisations des chapitres trois à cinq.

Table C.1 – Données physiques utilisées dans les optimisations.

Description	Symbole	Valeur
Fréquence du réseau de distribution électrique	f_s	50 Hz
Coefficient des pertes par hystérésis	k_H	90 A.m.V ⁻¹ .s ⁻¹
Coefficient des pertes par courants de Foucault	k_{cF}	0.065 A.m.V ⁻¹
Coefficient de remplissage	k_r	0,3
Coefficient de foisonnement des tôles du circuit magnétique	k_{lam}	0.96
Conductivité électrique du cuivre à 20 °C	σ_c	58.10 ⁸ S.m ⁻¹
Conductivité électrique de l'aluminium à 20 °C	σ_a	35.10 ⁸ S.m ⁻¹
Coefficient de transfert thermique	h	7 W.m ⁻² .K ⁻¹
Capacité thermique massique du cuivre	\mathcal{C}_c^m	385 J.K ⁻¹
Capacité thermique massique de l'aluminium	\mathcal{C}_{al}^m	904 J.K ⁻¹
Capacité thermique massique du fer	\mathcal{C}_{fe}^m	460 J.K ⁻¹
Tension primaire du transformateur	U_1	9 V
Tension secondaire du transformateur	U_2	230 V
Epaisseur d'isolant entre le bobinage et le circuit magnétique du transformateur	e_i	1e-3 m
Conductivité thermique de l'isolant entre le bobinage et le circuit magnétique du transformateur	λ_i	0.29 W.K ⁻¹ .m ⁻¹
Epaisseur du carter	e_c	4 mm
Limite élastique à l'extension	σ_e	50 MPa

Table C.2 – Données utilisées dans les optimisations dans le cadre du calcul des objectifs.

Description	Symbole	Valeur
Masse volumique du cuivre	ρ_c	8860 kg.m ⁻³
Masse volumique de l'aluminium	ρ_{al}	2700 kg.m ⁻³
Masse volumique du fer	ρ_{fe}	7600 kg.m ⁻³
Masse volumique de la fonte	ρ_{fo}	7100 kg.m ⁻³
Energie d'extraction et production d'un kilogramme de cuivre	$E_{p,c}$	8,7 kWh
Energie de production d'un kilogramme de cuivre recyclé	$E_{pr,c}$	5,5 kWh
Energie d'extraction et production d'un kilogramme d'acier	$E_{p,ac}$	6,3 kWh
Energie de production d'un kilogramme d'acier recyclé	$E_{p,ac}$	2,4 kWh
Energie d'extraction et production d'un kilogramme d'aluminium	$E_{p,al}$	31,4 kWh
Energie de production d'un kilogramme d'aluminium recyclé	$E_{p,al}$	6,2 kWh
Energie de transport en Camion >32 t d'une masse d'un kilogramme sur 1000 km	E_t	0,6 kWh
Energie de production d'un kilowattheure avec le mix énergétique français basse tension	$E_{p,fr}$	3,6 kWh
Energie de production d'un kilowattheure avec le mix énergétique européen basse tension	$E_{p,eu}$	3,1 kWh
kg éq. CO ₂ d'extraction et production d'un kilogramme de cuivre	$GW P_{p,c}$	2,0 kg
kg éq. CO ₂ d'extraction et production d'un kilogramme d'acier	$GW P_{p,ac}$	1,5 kg
kg éq. CO ₂ d'extraction et production d'un kilogramme d'aluminium mix européen	$GW P_{p,al}$	8,0 kg
kg éq. CO ₂ de transport en Camion >32 t d'une masse d'un kilogramme sur 1000 km	$GW P_t$	0,2 kg
kg éq. CO ₂ de production d'un kilowattheure avec le mix énergétique français basse tension	$GW P_{p,fr}$	0,1 kg
kg éq. CO ₂ de production d'un kilowattheure avec le mix énergétique européen basse tension	$GW P_{p,eu}$	0,6 kg

Modélisation linéaire de la machine asynchrone monophasée à condensateur permanent

Dans cette annexe sont regroupées les expressions conduisant à la modélisation linéaire d'une machine asynchrone monophasée à capacité permanente dont les courants sont déséquilibrés [Alg70, BN01].

1. Principaux calculs

1.1 Schéma équivalent monophasé

Ce modèle est défini sur la base des composantes fondamentales (1er harmonique). Les grandeurs sont considérées comme sinusoïdales, hypothèse liées également à la linéarité magnétique, permettant le principe de superposition. Notons que les calculs électriques sont identiques à ceux effectués dans le cas de la machine asynchrone triphasée, présentés en Annexe F, page 241.

Nous définissons avant tout quatre indices de notations. Ainsi une grandeur associée à un indices p , a , d ou i se rapportera respectivement à une phase principale, auxiliaire (de la machine réelle), directe ou inverse (de la machine fictive).

Nous travaillons sur la machine à bobinage diamétral équivalente, c'est-à-dire qu'un coefficient de bobinage k_{bs} est appliqué au nombre de spires. Le calcul de ce coefficient, spécifique dans le cas de cette machine, est présenté à la section §2.1, page 233.

Les deux phases principales et auxiliaires alimentées par des courants sinusoïdaux (pas nécessairement en quadrature) I_p et I_a , produisent une force magnétomotrice résultante d'entrefer que nous décomposons en deux parties associées à deux champs tournants, direct et inverse. L'origine des phases est prise sur le courant principal. En notant ω_s la pulsation d'alimentation statorique, la force magnétomotrice due à la contribution de ces deux courants s'écrit, après décomposition :

$$\varepsilon(t, \gamma) = \frac{4}{\pi} \frac{Nk_{bs}}{2} \left[\underbrace{\sqrt{2}I_p \cos(\omega_s t)}_{i_p(t)} \cos p\gamma + \underbrace{\sqrt{2}I_a \cos(\omega_s t - \phi_a)}_{i_a(t)} \sin p\gamma \right] \quad (\text{D.1a})$$

puis une décomposition appropriée

$$\begin{aligned} \varepsilon(t, \gamma) = \frac{2\sqrt{2}Nk_{bs}}{\pi} & \left[\cos(\omega_s t + p\gamma) \left(\frac{I_p}{2} - \frac{I_a}{2} \sin \phi_a \right) + \sin(\omega_s t + p\gamma) \frac{I_a}{2} \cos \phi_a \right. \\ & \left. + \cos(\omega_s t - p\gamma) \left(\frac{I_p}{2} + \frac{I_a}{2} \sin \phi_a \right) - \sin(\omega_s t - p\gamma) \frac{I_a}{2} \cos \phi_a \right] \end{aligned} \quad (\text{D.1b})$$

Nous utilisons l'astuce de calcul suivante pour décomposer ε . En notant $A_1, A_2, A_3, A_4, \xi_1, \xi_2$ et ξ_3 des constantes, nous avons :

$$A_1 \cos \xi_1 + A_2 \sin \xi_1 = \sqrt{A_1^2 + A_2^2} \left[\underbrace{\frac{A_1}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}}}_{A_3} \cos \xi_2 + \underbrace{\frac{A_2}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}}}_{A_4} \sin \xi_2 \right] \quad (\text{D.2})$$

En remarquant que $A_3^2 + A_4^2 = 1$, nous savons qu'il existe un angle ξ_3 tel $\cos \xi_3 = A_3$ et $\sin \xi_3 = A_4$. En appliquant cette remarque à la décomposition de la force magnétomotrice d'entrefer, nous obtenons :

$$I_d = \sqrt{\left(\frac{I_p}{2} - \frac{I_a}{2} \sin \phi_a \right)^2 + \left(\frac{I_a}{2} \cos \phi_a \right)^2} \quad (\text{D.3a})$$

et

$$I_i = \sqrt{\left(\frac{I_p}{2} + \frac{I_a}{2} \sin \phi_a\right)^2 + \left(\frac{I_a}{2} \cos \phi_a\right)^2} \quad (\text{D.3b})$$

avec les angles

$$\cos \phi_d = \frac{I_p - I_a \sin \phi_a}{2I_d} \quad \sin \phi_d = \frac{I_a \cos \phi_a}{2I_d} \quad (\text{D.3c})$$

$$\cos \phi_i = \frac{I_p + I_a \sin \phi_a}{2I_i} \quad \sin \phi_i = -\frac{I_a \cos \phi_a}{2I_i} \quad (\text{D.3d})$$

puis vient la décomposition de ε en deux champs tournants en sens opposés

$$\varepsilon(t, \gamma) = \underbrace{\frac{2\sqrt{2}Nk_{bs}}{\pi} I_d \cos(\omega_s t - p\gamma - \phi_d)}_{\varepsilon_d(t, \gamma)} + \underbrace{\frac{2\sqrt{2}Nk_{bs}}{\pi} I_i \cos(\omega_s t + p\gamma - \phi_i)}_{\varepsilon_i(t, \gamma)} \quad (\text{D.3e})$$

Pour ces deux champs tournants en sens opposés nous construisons un modèle diphasé équilibré équivalent, direct et inverse. A chaque champ tournant est associée une machine diphasée asynchrone fictive qui se trouve naturellement dans les conditions de symétrisation (courants en quadrature électrique et de même amplitude) comme décrit à la Figure D.1.

L'obtention des deux forces magnétomotrices se fait par les choix de courants suivants :

$$\varepsilon_d(t, \gamma) = \frac{2\sqrt{2}Nk_{bs}}{\pi} I_d \cos(\omega_s t - p\gamma - \phi_d) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} i_{dp}(t) = \sqrt{2}I_d \cos(\omega_s t - \phi_d) \\ i_{da}(t) = \sqrt{2}I_d \sin(\omega_s t - \phi_d) \end{cases} \quad (\text{D.4a})$$

$$\varepsilon_i(t, \gamma) = \frac{2\sqrt{2}Nk_{bs}}{\pi} I_i \cos(\omega_s t + p\gamma - \phi_i) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} i_{ip}(t) = \sqrt{2}I_i \cos(\omega_s t - \phi_i) \\ i_{ia}(t) = \sqrt{2}I_i \sin(\omega_s t - \phi_i) \end{cases} \quad (\text{D.4b})$$

De la décomposition de la force magnétomotrice ε en ε_d et ε_i nous écrivons les relations entre les amplitudes des différents courants définis :

$$\underline{I}_p = \sqrt{2}I_p e^{j\omega_s t} \quad \underline{I}_{dp} = \sqrt{2}I_d e^{j\omega_s t - \phi_d} \quad \underline{I}_{ip} = \sqrt{2}I_i e^{j\omega_s t - \phi_i} \quad (\text{D.5a})$$

$$\underline{I}_a = \sqrt{2}I_a e^{j\omega_s t - \phi_a} \quad \underline{I}_{da} = \sqrt{2}I_d e^{j\omega_s t - \phi_d + \frac{\pi}{2}} \quad \underline{I}_{ia} = \sqrt{2}I_i e^{j\omega_s t - \phi_a + \frac{\pi}{2}} \quad (\text{D.5b})$$

ce que nous écrivons sous la forme suivante

$$\underline{I}_p = \underline{I}_{dp} + \underline{I}_{ip} \quad \underline{I}_a = \underline{I}_{da} + \underline{I}_{ia} \quad j\underline{I}_{dp} = \underline{I}_{da} \quad -j\underline{I}_{ip} = \underline{I}_{ia} \quad (\text{D.5c})$$

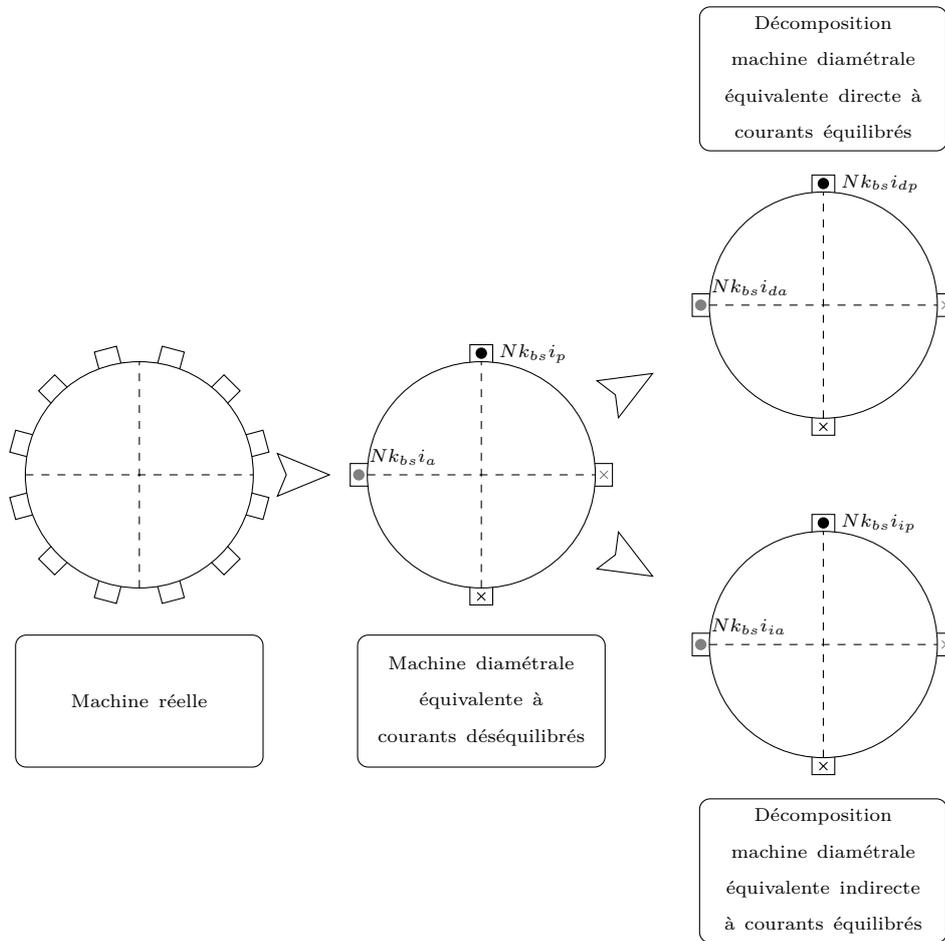


Figure D.1 – Décomposition de la machine réelle à courants déséquilibrés en deux machines diamétrales équivalentes directe et indirecte.

Le glissement n'est pas le même en direct et en indirect. Nous notons Ω_s la vitesse mécanique de synchronisme et Ω la vitesse mécanique de rotation. D'après l'équation (D.6), nous prenons comme référence le glissement direct que nous notons g . Le glissement de la machine fictive inverse s'écrit donc $2 - g$.

$$g_d = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad g_i = \frac{-\Omega_s - \Omega_r}{-\Omega_s} = 2 - s_d \quad (D.6)$$

Les deux phases (principale et auxiliaire) des deux machines fictives (directe et indirecte) issues de la décomposition de la force magnétomotrice d'entrefer de la machine initiale présentent des courants sinusoïdaux de même amplitude et déphasés de 90 degrés électriques. Pour chacune d'elles, nous pouvons donc écrire les équations de fonctionne-

ments classiques que nous réduisons à un schéma monophasé équivalent. Les deux phases de la machine fictive directe sont identiques entre elles, tout comme le sont celles de la machine fictive inverse. Les deux machines étant structurellement identiques, leur schéma équivalent monophasé est composé des mêmes éléments, comme présente à la Figure D.2.

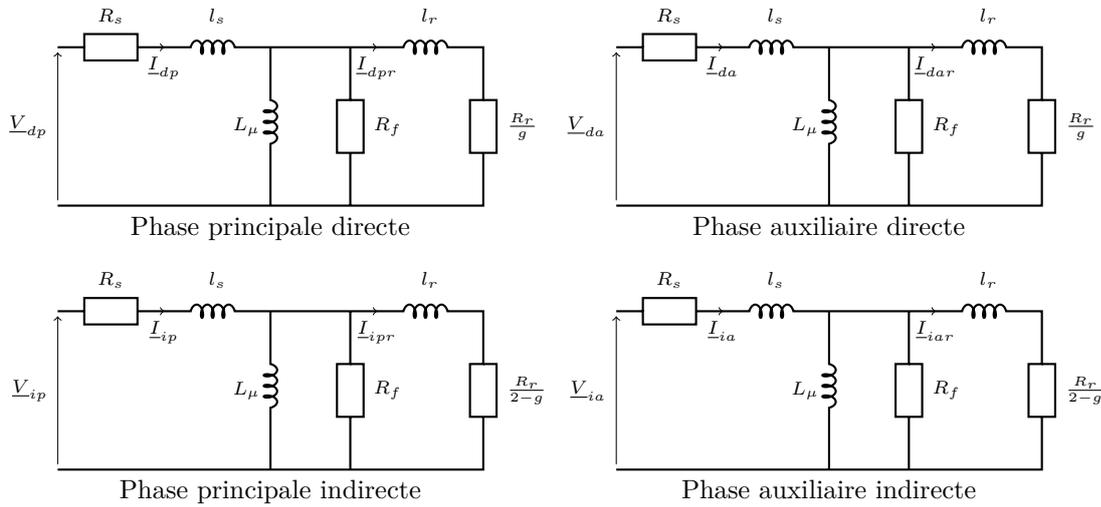


Figure D.2 – Circuits équivalents des deux phases (principale et auxiliaire) des deux machines fictives (directe et indirecte).

Nous pouvons résumer l'étude de ces quatre schémas à seulement deux (un direct et un indirect) en notant qu'ils sont équivalents deux à deux. Pour assurer l'équivalence en puissance, nous multiplierons par deux les calculs faits sur une seule phase. Nous souhaitons maintenant relier les deux schémas restant. Nous écrivons les impédances des schémas :

$$\underline{V}_{dp} = \underline{Z}_d \underline{I}_{dp} \quad \underline{V}_{ip} = \underline{Z}_i \underline{I}_{ip} \quad \underline{V}_{da} = \underline{Z}_d \underline{I}_{da} \quad \underline{V}_{ia} = \underline{Z}_i \underline{I}_{ia} \quad (\text{D.7a})$$

ce qui nous donne en introduisant les courants définis à l'équation (D.5c) :

$$j\underline{V}_{dp} = \underline{I}_{da} \quad -j\underline{V}_{ip} = \underline{I}_{ia} \quad (\text{D.7b})$$

Nous souhaitons de plus avoir une conservation de la puissance instantanée entre la machine équivalente initiale et les deux machines fictives représentant les composantes directes et inverses de la force magnétomotrice. Cette conservation de la puissance s'écrit en complexe :

$$\underline{V}_p \underline{I}_p^* + \underline{V}_a \underline{I}_a^* = \underline{V}_{dp} \underline{I}_{dp}^* + \underline{V}_{ip} \underline{I}_{ip}^* + \underline{V}_{da} \underline{I}_{da}^* + \underline{V}_{ia} \underline{I}_{ia}^* \quad (\text{D.8a})$$

ce qui donne en décomposant les courants :

$$\underline{V}_p(\underline{I}_{dp}^* + \underline{I}_{ip}^*) + j\underline{V}_a(-\underline{I}_{dp}^* + \underline{I}_{ip}^*) = 2(\underline{V}_{dp}\underline{I}_{dp}^* + \underline{V}_{ip}\underline{I}_{ip}^*) \quad (\text{D.8b})$$

puis en regroupant les termes selon les courants principaux

$$\underline{I}_{dp}^*(\underline{V}_p + j\underline{V}_a - 2\underline{V}_{dp}) = \underline{I}_{ip}^*(2\underline{V}_{ip} - \underline{V}_p - j\underline{V}_a) \quad (\text{D.8c})$$

Les courants \underline{I}_{dp}^* et \underline{I}_{ip}^* n'étant à priori pas toujours égaux, nous obtenons la décomposition des tensions principale et auxiliaire de la machine équivalente réelle :

$$\underline{V}_{dp} = \frac{1}{2}(\underline{V}_p - j\underline{V}_a) \quad \underline{V}_{da} = \frac{1}{2}(j\underline{V}_p + \underline{V}_a) \quad (\text{D.9a})$$

$$\underline{V}_{ip} = \frac{1}{2}(\underline{V}_p + j\underline{V}_a) \quad \underline{V}_{ia} = \frac{1}{2}(j\underline{V}_a - \underline{V}_p) \quad (\text{D.9b})$$

d'où la décomposition des tensions suivante :

$$\underline{V}_p = \underline{V}_{dp} + \underline{V}_{ip} \quad \underline{V}_a = \underline{V}_{da} + \underline{V}_{ia} \quad (\text{D.9c})$$

Il nous faut désormais relier ces deux schémas et introduire la capacité d'impédance \underline{Z}_c connectée en série avec la phase auxiliaire afin de travailler sur un schéma équivalent monophasé de la machine asynchrone diphasée. En sachant que les deux phases sont alimentées sous le même niveau de tension V_s , nous avons :

$$\underline{V}_p = V_s \quad \underline{V}_a + \underbrace{(\underline{I}_{da} + \underline{I}_{ia})}_{\underline{I}_a} \underline{Z}_c = V_s \quad (\text{D.10})$$

En utilisant les relations établies précédemment, nous avons donc :

$$\underline{V}_{da} = \frac{1}{2}V_s(1 + j) - \frac{1}{2}(\underline{I}_{da} + \underline{I}_{ia})\underline{Z}_c \quad \underline{V}_{ia} = \frac{1}{2}V_s(1 - j) - \frac{1}{2}(\underline{I}_{da} + \underline{I}_{ia})\underline{Z}_c \quad (\text{D.11a})$$

$$\underline{V}_{dp} = \frac{1}{2}V_s(1 - j) - \frac{1}{2}(\underline{I}_{dp} + \underline{I}_{ip})\underline{Z}_c \quad \underline{V}_{ip} = \frac{1}{2}V_s(1 + j) - \frac{1}{2}(\underline{I}_{dp} - \underline{I}_{ip})\underline{Z}_c \quad (\text{D.11b})$$

Nous pouvons ainsi associer les deux schémas directs et inverses de la phase auxiliaire en un schéma équivalent monophasé incluant la capacité, à partir de la phase principale ou de la phase auxiliaire, présentés à la Figure D.3. Les deux schémas sont équivalents du point de vue de la conservation de la puissance instantanée consommée par la machine, qui

vaut $2(V_{dp}I_{dp}^* + V_{ip}I_{ip}^*)$ pour un calcul sur la phase principale ou $2(V_{da}I_{da}^* + V_{ia}I_{ia}^*)$ pour un calcul sur la phase secondaire. Nous pouvons choisir indifféremment l'un ou l'autre pour le calcul du couple. Par contre, la puissance réactive absorbée par la capacité mise en série avec la phase auxiliaire n'est pas représentée entièrement dans un seul schéma : elle apparaît multipliée par deux.

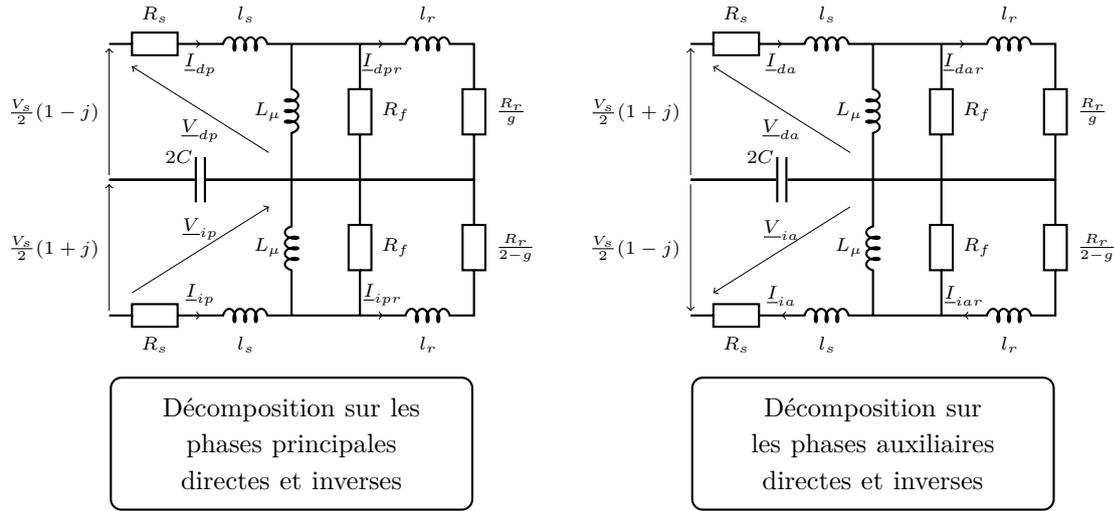


Figure D.3 – Schémas équivalents monophasés de la machine asynchrone diphasée.

1.2 Calcul du couple

Nous décomposons le schéma en trois impédances parallèle : l'impédance de la partie directe \underline{Z}_d , celle de la partie inverse \underline{Z}_i et celle de la branche centrale \underline{Z}_c . Nous avons :

$$\underline{Z}_d = R_s + j l_s \omega_s \left[j L_M \omega_s \parallel R_c l \parallel \left(j l_r \omega_s + \frac{R_r}{s} \right) \right] \quad (\text{D.12a})$$

$$\underline{Z}_c = \frac{1}{2jC\omega_s} \quad (\text{D.12b})$$

$$\underline{Z}_i = R_s + j l_s \omega_s \left[j L_M \omega_s \parallel R_c l \parallel \left(j l_r \omega_s + \frac{R_r}{2-s} \right) \right] \quad (\text{D.12c})$$

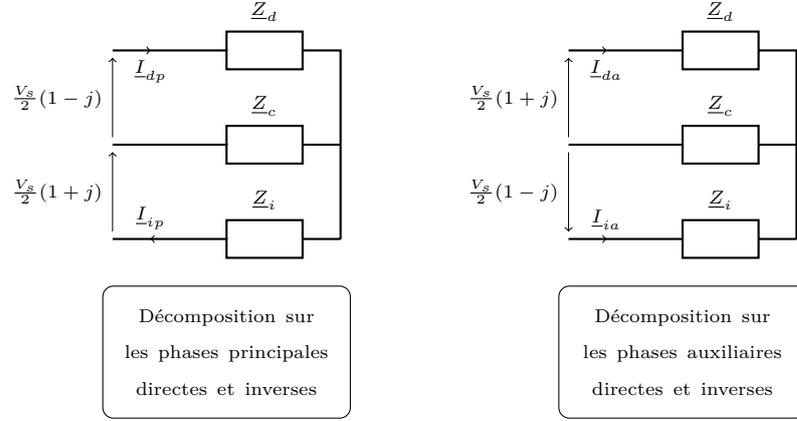


Figure D.4 – Simplification des schémas équivalents de la machine asynchrone diphasée.

Les systèmes à résoudre sont les suivants :

$$\begin{bmatrix} V_s(1-j) \\ V_s(1+j) \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} (\underline{Z}_d + \underline{Z}_c) & -\underline{Z}_c \\ -\underline{Z}_c & (\underline{Z}_i + \underline{Z}_c) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_{dp} \\ \underline{I}_{ip} \end{bmatrix} \quad \text{schéma principal} \quad (\text{D.13a})$$

$$\begin{bmatrix} V_s(1+j) \\ V_s(1-j) \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} (\underline{Z}_d + \underline{Z}_c) & \underline{Z}_c \\ \underline{Z}_c & (\underline{Z}_i + \underline{Z}_c) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_{da} \\ \underline{I}_{ia} \end{bmatrix} \quad \text{schéma auxiliaire} \quad (\text{D.13b})$$

ce qui donne les expressions des courants suivantes :

$$\underline{I}_{dp} = \frac{V_s(1-j)\underline{Z}_i + 2V_s\underline{Z}_c}{2(\underline{Z}_i\underline{Z}_d + \underline{Z}_c(\underline{Z}_i + \underline{Z}_d))} \quad \underline{I}_{ip} = \frac{V_s(1+j)\underline{Z}_d + 2V_s\underline{Z}_c}{2(\underline{Z}_i\underline{Z}_d + \underline{Z}_c(\underline{Z}_i + \underline{Z}_d))} \quad (\text{D.13c})$$

$$\underline{I}_{da} = \frac{V_s(1+j)\underline{Z}_i + 2V_s\underline{Z}_c}{2(\underline{Z}_i\underline{Z}_d + \underline{Z}_c(\underline{Z}_i + \underline{Z}_d))} \quad \underline{I}_{ia} = \frac{V_s(1-j)\underline{Z}_d - 2V_s\underline{Z}_c}{2(\underline{Z}_i\underline{Z}_d + \underline{Z}_c(\underline{Z}_i + \underline{Z}_d))} \quad (\text{D.13d})$$

Le couple électromagnétique s'obtient à partir de la puissance transmise au rotor à laquelle sont retranchées les pertes Joule rotoriques. Le couple se décompose en deux composantes opposées, la première issue du champ direct et la seconde du champ inverse.

$$T_d = \frac{2R_r|\underline{I}_{rd}|^2}{g\omega_s} \quad T_i = \frac{2R_r|\underline{I}_{ri}|^2}{(2-g)(-\omega_s)} \quad (\text{D.14a})$$

ou directement à partir des courants statoriques

$$T_d = \frac{2p|I_{dp}|^2}{\omega_r} (\Re(\underline{Z}_d) - R_s - R_{cl}) = \frac{2p|I_{da}|^2}{\omega_r} (\Re(\underline{Z}_d) - R_s - R_{cl}) \quad (\text{D.14b})$$

$$T_i = \frac{2p|I_{ip}|^2}{\omega_r} (\Re(\underline{Z}_i) - R_s - R_{cl}) = \frac{2p|I_{ia}|^2}{\omega_r} (\Re(\underline{Z}_i) - R_s - R_{cl}) \quad (\text{D.14c})$$

2. Calculs annexes

2.1 Coefficients de bobinage

2.1.1 Au stator

Nous remplaçons le moteur réel par une machine équivalente à bobinage diamétral. Le bobinage des deux phases statoriques est identique, décalé spatialement de 90° mécaniques. Il y a une combinaison de bobinage raccourci et de bobinage distribué. Nous recalculons directement le coefficient de distribution sous la forme d'une modification du nombre de spire par encoches plutôt que d'appliquer les coefficients usuels, plus difficile à extrapoler ici.

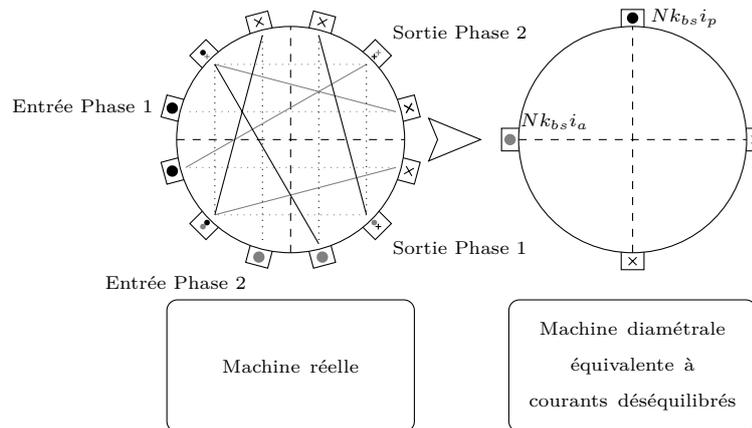


Figure D.5 – Schéma de bobinage de la machine réelle.

Toutes les encoches contiennent n conducteurs. Les encoches qui se partagent deux phases présentent des faisceaux de $n/2$ conducteurs. Le moteur réel présente donc un nombre de spires par phases au stator de $N = 3n$.

En travaillant au fondamental, la comparaison de l'amplitude maximale des forces magnétomotrice dans le cas de la machine réelle à celle des forces magnétomotrices dans le cas d'une machine équivalente possédant deux bobinages diamétraux en quadrature mécanique avec Nk_{bs} spires par phase nous permet d'écrire l'expression du coefficient de distribution statorique, k_{bs} .

$$k_{bs} = \frac{1}{3} \left(2 \cos \frac{\alpha_{sr}}{2} + \cos \frac{3\alpha_{sr}}{2} \right) \quad (\text{D.15})$$

2.1.2 Au rotor

Le filtrage des harmoniques d'encoches rotorique a lieu par l'intermédiaire de l'inclinaison des barres rotoriques par rapport à l'axe de l'arbre moteur. Cette inclinaison se fait selon l'angle d'un pas d'encoche rotorique. Le coefficient d'inclinaison est le seul qui intervient au rotor. Sa valeur interviendra comme une modification du nombre de spires par phase rotorique. En notant N_r le nombre d'encoches rotoriques, nous avons :

$$k_{br} = \frac{N_r}{\pi} \sin \frac{\pi}{N_r} \quad (\text{D.16})$$

2.2 Rapport de transformation stator-rotor

Il est identique à celui calculé en Annexe F, à la section §2.2 page 246, sans aller jusqu'à la formulation par spire.

Modélisation mécanique des parties inactives de la machine asynchrone triphasée

1. Masse des parties inactives

L'utilisation effective d'une machine nécessite le maintien mécanique de ses parties actives par un carter, des pieds ou des rails pour la maintenir en position de fonctionnement et les roulements pour positionner le carter autour de l'arbre transmettant le couple utile. Suivant la machine, un système de refroidissement est aussi prévu. Celui-ci va d'une simple ventilation assurée par des ailettes le long des anneaux de court-circuit de la cage rotorique à un refroidissement liquide. Le choix d'un refroidissement différent selon la puissance nominale de la machine entraînerait une complexification des modélisations thermiques et géométriques différents sans apporter de différences méthodologiques significatives. Nous fixons donc le refroidissement du modèle de machine considéré à une ventilation assurée par un ventilateur fixé en bout d'arbre. Dans ce cas de figure, nous sommes en mesure d'estimer la masse des parties inactives à partir de la seule description géométrique des parties actives.

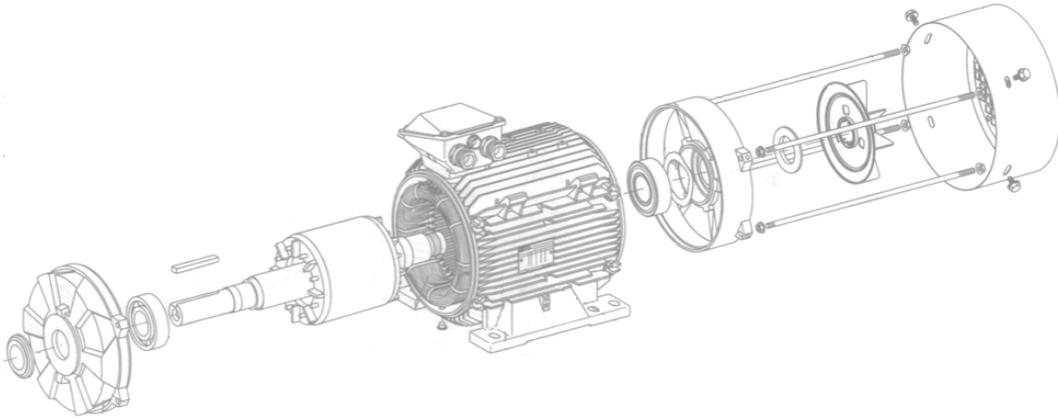


Figure E.1 – Vue éclatée du conditionnement d'une machine asynchrone, documentation Leroy-Sommer [LS98].

Dans le cadre d'un refroidissement à air, nous proposons à la Figure E.1 un exemple de vue éclatée du conditionnement d'une machine asynchrone. Nous regroupons de plus dans la Table E.1 la composition classique des principales constituantes inactives apparaissant sur cette figure.

Table E.1 – Composition des parties inactives constitutives d'une machine asynchrone [LS98].

Partie	Matériau
Carter	Alliage d'aluminium
Pieds de maintien	Fonte
Arbre	Acier courant
Fermetures du carter (flasques)	Alliage d'aluminium ou fonte
Roulements	Acier spécifique
Ailettes de ventilation	Alliage d'aluminium ou plastique composite
Capot du ventilateur	Plastique composite ou acier de presse
Boîtier de connexion	Plastique composite ou alliage d'aluminium

1.1 Carter

Dans nos calculs, nous choisissons le carter et les flasques en alliage d'aluminium, les pieds soutenant la machine en fonte et les ailettes du ventilateur ainsi que sa protection en acier pressé. Nous ne considérons pas le terminal de connectique dont la taille ne dépend pas des dimensions de la machine et disparaît donc dans une comparaison d'écobilans.

Nous proposons à la Figure E.2 une vue schématique du carter de la machine sans représenter les ailettes du carter ainsi qu'une coupe faisant apparaître les parties actives. En plus du diamètre extérieur statorique D_{es} , nous définissons l'épaisseur du carter e_{ca} , l'épaisseur d'arbre dépassant du carter e_a , l'épaisseur des flasques e_f et enfin l'épaisseur d'arbre dépassant du côté de la protection de ventilation e_{av} .

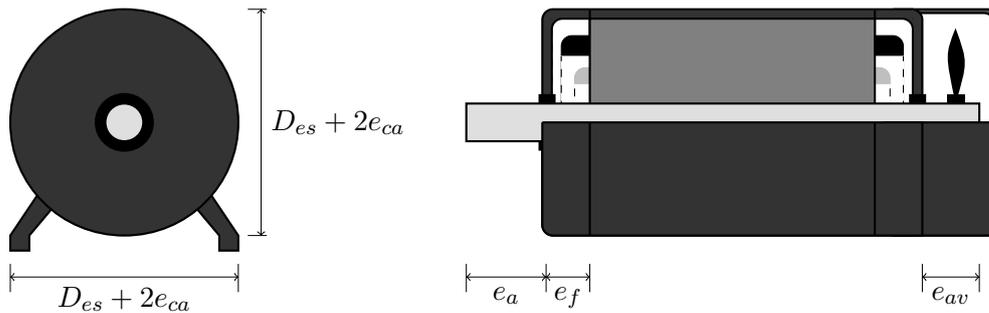


Figure E.2 – Représentation du carter de la machine asynchrone triphasée sans les ailettes de refroidissement.

L'épaisseur du carter est sur-dimensionnée du point de vue de la tenue mécanique. Son épaisseur ne dépend donc pas du diamètre extérieur statorique dans les gammes de puissances considérées dans nos simulations. Nous la fixons à 4 mm après consultation de plusieurs catalogues constructeurs. Nous considérons dix ailettes par côté de machine, de la même épaisseur que le carter et de hauteur triple.

L'épaisseur de la protection de ventilation est choisie indépendante de la machine considérée. Nous supposons que l'extrémité des ailettes de ventilation se situent au niveau des têtes de bobines et que ces ailettes, si elles étaient « repliées », donneraient un cylindre.

1.2 Roulements

Le choix des roulements dépend du diamètre de l'arbre. Nous sélectionnons des roulements typiques utilisés dans la construction de machines asynchrones triphasées de moins de 500 kW [LS98], à savoir des roulements rigides à une rangée de billes JBC de la série 6200 [JBC07]. Nous supposons de plus que les roulements de part et d'autre de l'arbre sont identiques.

Nous présentons à la Figure E.3 (gauche) l'évolution de la masse des roulements en fonction de leur diamètre interne (le diamètre de l'arbre) ainsi que la relation idéalisée entre ces deux grandeurs que nous utilisons dans nos calculs. Cette loi nous permet d'estimer la masse des roulements en fonction du diamètre de l'arbre.

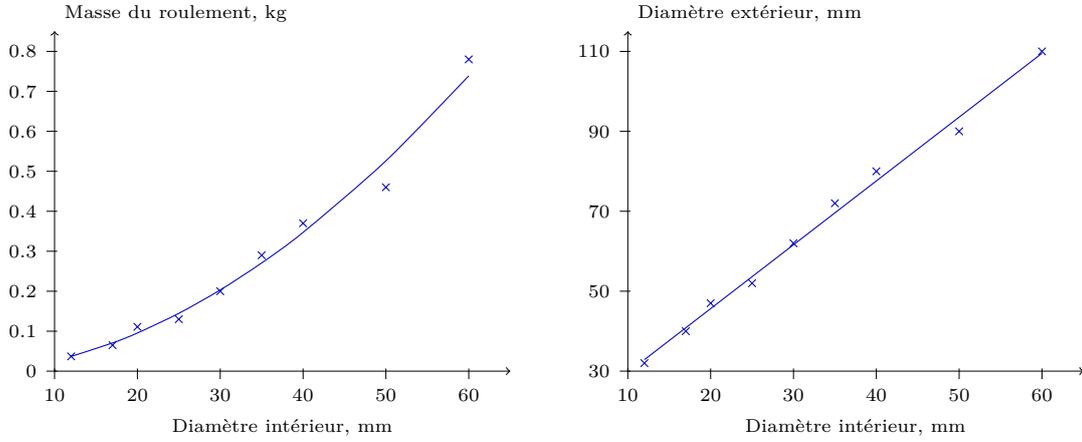


Figure E.3 – Masse et diamètre extérieur des roulements rigides à billes à une rangée JBC de la série 6200 ZZ C3 en fonction de leur diamètre interne [JBC07].

Nous présentons à la Figure E.3 (droite) l'évolution du diamètre extérieur des roulements, noté D_r en fonction de leur diamètre intérieur ainsi que la relation linéarisée entre ces deux grandeurs que nous utilisons dans nos calculs. Cette loi nous permet d'estimer le diamètre extérieur des roulements en fonction du diamètre de l'arbre.

1.3 Masses

$$V_{ca} = k_{ac} \frac{\pi}{4} \left[(D_{es} + 2e_{ca})^2 (L_a k_{lam} + 2e_f) - 2e_{ca} D_r^2 - (L_a k_{lam} + 2e_f - 2e_{ca}) D_{es}^2 \right] + 40 L_a k_{lam} \cdot 3e_{ca}^2 \quad (\text{E.1a})$$

$$V_{ar} = \frac{\pi}{4} D_{ir}^2 (L_a k_{lam} + 2e_f + e_a + e_{av}) \quad (\text{E.1b})$$

$$V_p = \frac{(D_{es} + e_{ca})^2}{18} L_a k_{lam} \quad (\text{E.1c})$$

$$V_v = \frac{\pi}{4} (D_{es}^2 D_r^2) e_{vt} \quad (\text{E.1d})$$

$$V_{pt} = e_{pt} \left[\frac{3\pi}{2} e_{av} (D_{es} + 2e_{ca}) + \frac{\pi}{4} (D_{es} + 2e_{ca})^2 \right] \quad (\text{E.1e})$$

puis l'expression de la masse des parties inactives :

$$M_{nac} = \underbrace{\rho_{al} V_{ca}}_{M_{ca}} + \underbrace{\rho_{ac} V_{ar}}_{M_{ar}} + \underbrace{\rho_{fo} V_p}_{M_p} + M_r + \underbrace{\rho_{ac} V_v}_{M_v} + \underbrace{\rho_{ac} V_{pt}}_{M_{pt}} \quad (\text{E.1f})$$

En notant V_{ca} , V_{ar} , V_p , V_v et V_{pt} respectivement le volume du carter, de l'arbre, des pieds et de la ventilation et de la protection du ventilateur de la machine, ρ_{fo} la masse volumique de la fonte et ρ_{ac} celle de l'acier. Nous notons enfin e_{vt} et e_{pt} l'épaisseur des ailettes de refroidissement et de la protection du ventilateur.

2. Dimensionnement de l'arbre

Le rayon de l'arbre chargé de transmettre le couple utile subit une contrainte mécanique en fonction du couple extérieur de torsion qui lui est imposé. Nous choisissons dans nos simulations un rayon d'arbre minimal tel qu'il puisse transmettre le couple maximal défini dans le cahier des charges avec une bonne résistance à la fatigue mécanique [ALR04]. Les hypothèses considérées dans ce calcul de résistance des matériaux appliqué à l'arbre sont les suivantes :

- le solide étudié est un cylindre de révolution
- le diamètre de la section est constant
- le poids du solide est négligé
- la surface du cylindre est parfaitement polie
- les déformations sont limitées au domaine élastique et la variation de longueur des fibres est considérée comme négligeable.

L'arbre moteur est soumis à une contrainte de torsion dont nous notons $|\hat{\mathcal{M}}_t|$ le moment de torsion maximal. Nous assimilons ce moment de torsion au couple du moteur, \hat{C} . Dans le cas d'un cylindre plein de rayon R_{ir} la contrainte maximale en torsion $|\hat{\tau}|$ s'écrit :

$$|\hat{\tau}| = \frac{16\hat{C}}{\pi(2R_{ir})^3} \quad (\text{E.2})$$

Nous considérons qu'il y a risque de rupture de l'intégrité mécanique de l'arbre lorsque la contrainte maximale de torsion dépasse la valeur de la limite élastique à l'extension σ_e pondérée d'un coefficient dépendant du critère de limite élastique choisi. Le critère de Tresca considère par exemple la limite élastique atteinte lorsqu'elle vaut la moitié limite élastique à l'extension du matériau constitutif alors le critère de Von Mises considère un rapport de $\sqrt{3}$. En retenant le critère de Von Mises, nous déterminons la valeur minimale du rayon de l'arbre de la machine sous un effort de torsion engendrant des cisaillements.

$$R_{ir} \geq \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{16\sqrt{3}\hat{C}}{\pi\sigma_e}} \quad (\text{E.3})$$

Modélisation électrique de la machine asynchrone triphasée

1. Eléments du schéma électrique

Nous donnons dans la première section les expressions nécessaires au calcul des éléments du schéma électrique monophasé équivalent présenté au Chapitre 5, Figure 5.2 page 150. La seconde section regroupe le calcul des coefficients nécessaires à l'établissement des expressions présentées ici.

1.1 Résistance spécifique du bobinage

En notant L_s la longueur moyenne d'une spire du bobinage statorique, p le nombre de paire de pôles, D_{fs} le diamètre de fond d'encoche statorique, h_{es} la hauteur d'encoche statorique, L_a la longueur active de la machine, k_{lam} le coefficient de foisonnement, N_s le nombre d'encoches statoriques, σ_c la conductivité électrique du cuivre, k_r le coefficient de remplissage des encoches et S_{es} la section d'une encoche statorique, nous avons [Alg70] :

$$r_s = \frac{L_s N_s}{3\sigma_c k_r S_{es}} \text{ avec } L_s = L_a k_{lam} + h_{es} + \frac{\pi}{2p} (D_{fs} - h_{es}) \quad (\text{F.1})$$

1.2 Perméance de fuites statorique

Pour les formes d'encoches considérées, le calcul de la perméance équivalente aux fuites statoriques n'est pas aisé sans éléments finis. Il existe cependant des expressions donnant une valeur approchée [Fog99] que nous utilisons dans notre modélisation. Ainsi, dans le cas d'une encoche arrondie comme définie au Chapitre 5, Figure 5.1 page 147, l'expression de la perméance de fuites statorique s'écrit en définissant e_{is} l'épaisseur et h_{is} la hauteur d'isthme d'encoche statorique :

$$\mathcal{P}_s = \mu_0 L_a k_{lam} \frac{N_s}{3} \left(0,6 + \frac{h_{es} - e_{is}}{3e_{is}} + \frac{h_{is}}{e_{is}} \right) \quad (\text{F.2})$$

1.3 Perméance magnétisante

L'expression de la perméance magnétisante s'obtient à partir de la définition de la force magnétomotrice d'entrefer qui donne l'expression de l'induction et permet de remonter au flux embrassé par une phase. Nous définissons μ_0 la perméabilité magnétique du vide, k_c le coefficient de Carter (que nous définissons à la §2.3, page 246) k_{bs} le coefficient de bobinage statorique. Nous notons de plus h_e l'épaisseur d'entrefer et D_{is} le diamètre intérieur rotorique. Ainsi nous avons [Alg70] :

$$\mathcal{P}_\mu = \frac{3\mu_0 k_{bs}^2 D_{is} L_a k_{lam}}{\pi k_c h_e p^2} \quad (\text{F.3})$$

1.4 Résistance spécifique équivalente aux pertes fer

A partir de l'expression des pertes fer P_f estimées au Chapitre 5, à l'équation (5.9) page 152, en fonction de la tension par spire aux bornes de la perméance magnétisante e_s , nous avons :

$$r_f = \frac{e_s^2}{P_f} \quad (\text{F.4})$$

1.5 Résistance spécifique rotorique ramenée au stator

Du fait de l'inclinaison des barres rotoriques d'un pas d'encoche, leur longueur est supérieure à la longueur active. Nous définissons ainsi L_r la longueur active d'un conducteur rotorique d'après la Figure F.1 :

$$L_r = \sqrt{[L_a k_{lam}]^2 + \left[(D_{fr} + h_{er}) \sin\left(\frac{\pi}{N_r}\right) \right]^2} \quad (\text{F.5})$$

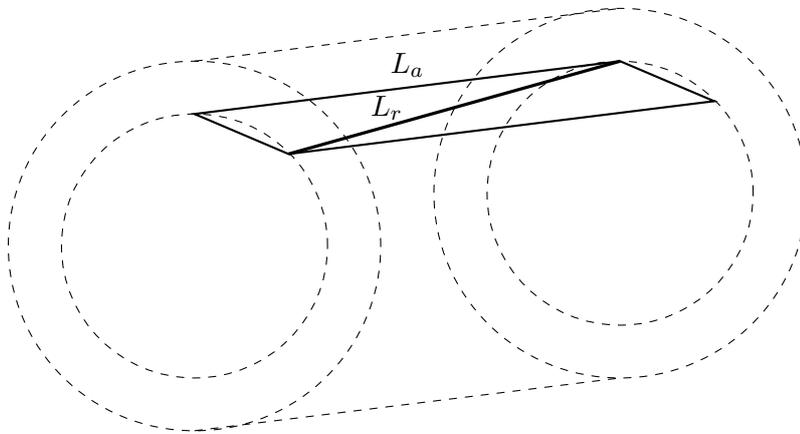


Figure F.1 – Inclinaison des barres rotoriques.

Sans effet de peau, la résistance d'un conducteur rotorique s'écrit en notant k_{bs} le coefficient de bobinage statorique, k_{ir} le coefficient d'inclinaison rotorique, N_r le nombre d'encoches rotorique et S_{er} la section d'une encoche rotorique. Notons que l'anneau de court-circuit est modélisé en prenant en compte la division du courant en sortie de barre dans les deux parties d'anneau la rejoignant.

$$r_{1b} = \frac{L_r'}{\sigma_a S_{er}} \text{ avec } L_r' = L_r + \frac{\pi}{2N_r} (D_{fr} + h_{er}) \quad (\text{F.6})$$

Nous relierons la résistance d'une barre à la résistance spécifique rotorique ramenée au stator par conservation de la puissance active. En effet, les pertes Joule rotoriques P_{J_r} sont égales à la puissance transmise du stator au rotor P_t multipliée par le glissement g et le nombre de phases. Nous notons e_b la tension par spire aux borne d'une barre rotorique, e_s la tension par spire aux bornes de la résistance rotorique ramenée au stator et m le

rapport de transformation, défini à la section §2.2, page 246.

$$P_{Jr} = 3gP_t \Rightarrow N_r r_{1b} \left(\frac{e_b}{r_{1b}} \right)^2 = 3g \frac{r_r}{g} \frac{e_s^2}{\left(\frac{r_r}{g} \right)} \Rightarrow N_r \frac{e_b^2}{r_{1b}} = 3 \frac{(ge_s)^2}{r_r} \quad (\text{F.7a})$$

La relation $e_b = gme_s$ nous donne enfin :

$$r_r = r_{1b} \frac{3}{N_r m^2} \quad (\text{F.7b})$$

Cette valeur de résistance est ensuite multipliée par un coefficient modélisant l'effet de peau dans les barres. Le calcul de ce coefficient est présenté à la section §2.4, page 246.

1.6 Perméance de fuites rotoriques ramenées au stator

Sans effet de peau, le calcul de la perméance équivalent aux fuites d'une encoche rotorique est identique à celui mené pour les encoches statoriques, proposé à l'équation (F.2). Nous ramenons ensuite l'expression de la perméance d'une barre rotorique à la perméance rotorique du schéma électrique statorique. Ainsi nous avons en notant e_{ir} l'épaisseur et h_{ir} la hauteur d'isthme d'encoche rotorique :

$$\mathcal{P}_{1b} = \mu_0 L_r \left(0,6 + \frac{h_{er} - 2e_{ir}}{3e_{ir}} + \frac{h_{ir}}{e_{ir}} \right) \quad (\text{F.8a})$$

puis ramenée à une phase du stator :

$$\mathcal{P}_r = \mathcal{P}_{1b} \frac{3}{N_r m^2} \quad (\text{F.8b})$$

Cette valeur de perméance est ensuite multipliée par un coefficient afin de prendre en compte l'effet de peau dans les barres. Le calcul de ce coefficient est présenté à la section §2.4, page 246.

2. Calculs annexes

2.1 Coefficient de bobinage

Nous prenons en compte dans la modélisation de la machine asynchrone le coefficient de distribution ainsi que celui d'inclinaison au premier ordre [Liw67]. Le bobinage n'est par contre pas raccourci.

2.1.1 Coefficient de distribution

La distribution du bobinage sur plusieurs encoches modifie le spectre de la force magnéto-motrice. Nous le prenons en compte en introduisant un coefficient de distribution qui modifiera le nombre de spires par phase en un nombre de spires effectif par phase. Au premier harmonique et dans le cas où les conducteurs occupent toute la zone de distribution possible (distribution régulière), nous avons au stator, en notant m_s le nombre d'encoche par pôle et par phase, α_{es} l'ouverture d'un pas d'encoche statorique :

$$k_{bs} = \frac{\sin\left(m_s p \frac{\alpha_{es}}{2}\right)}{m_s \sin\left(p \frac{\alpha_{es}}{2}\right)} \text{ avec } \alpha_{es} = \frac{2\pi}{N_s} \quad (\text{F.9})$$

2.1.2 Coefficient d'inclinaison

Les encoches engendrent une induction d'entrefer résultante comportant, en plus des harmoniques d'espace générées par la force magnéto-motrice d'induit, des harmoniques d'encoches. Le filtrage des harmoniques d'encoches peut s'effectuer par l'inclinaison ou le vrillage axial des tôles rotoriques. L'inclinaison des tôles se fera suivant un pas d'encoche. Nous considérons une inclinaison uniquement au rotor de la machine. Ainsi le coefficient d'inclinaison s'écrit en notant α_{er} l'ouverture d'un pas d'encoche rotorique :

$$k_{ir} = \frac{2 \sin\left(p \frac{\alpha_{er}}{2}\right)}{p \alpha_{er}} \text{ avec } \alpha_{er} = \frac{2\pi}{N_r} \quad (\text{F.10})$$

L'étude magnétique de la machine se fait sur un induit équivalent dont le bobinage est à pas diamétral concentrique ($m_s = 1$) et le nombre de spires en série par pôle et par phase est multiplié par le coefficient de bobinage k_{bs} au stator et k_{ir} au rotor.

2.2 Rapport de transformation par spire stator - rotor

Nous définissons le nombre de spires par phase au stator et au rotor respectivement N_{sps} et N_{spr} . La cage rotorique représente un système d'enroulement polyphasé dont chaque phase correspond à une barre. Une barre représentant une demi-spire, nous avons donc au rotor $2N_{spr} = 1$. Notons de plus que le coefficient de bobinage est unitaire quelque soit le rang d'harmonique considéré. L'expression du rapport de transformation entre des impédances statorique et rotorique s'écrit [Cha83] :

$$M = \left(\frac{k_{ir} N_{spr}}{k_{bs} N_{sps}} \right)^2 = \left(\frac{k_{ir}}{2N_{sps} k_{bs}} \right)^2 \quad (\text{F.11})$$

Dans le cas d'une modélisation par spire au stator, ce rapport de transformation des impédances statoriques rotoriques est « diminué » du nombre de spires statoriques [Alg70] afin de donner l'expression utilisée pour la résistance et la perméance rotoriques.

2.3 Entrefer équivalent de Carter

Nous calculons le coefficient de carter associé aux isthmes d'encoches statoriques et rotoriques, en supposant que leur effets sur la force magnéto-motrice sont découplés.

A partir des épaisseurs d'isthmes d'encoches e_{is} et e_{ir} , de la hauteur réelle d'entrefer h_e et des pas d'encoches d_s et d_r , nous calculons l'expression des deux coefficients de carter associés au stator et au rotor. Le coefficient de carter final est le produit des coefficients statorique et rotorique $k_c = k_{cs} k_{cr}$ [BO97]. La relation suivante permet de déterminer les coefficients de carter :

$$k_{cs} = \frac{d_s}{d_s - \frac{e_{is}^2}{h_e + e_{is}}} \quad k_{cr} = \frac{d_r}{d_r - \frac{e_{ir}^2}{h_e + e_{ir}}} \quad (\text{F.12})$$

2.4 Effet de peau

L'effet de peau intervient particulièrement dans le cas de faibles fréquences de courant et d'encoches suffisamment profondes. Cet effet n'est donc considéré qu'au rotor dans notre modélisation. La prise en compte de l'effet de peau n'est pas aisée sans éléments fini, mais reste possible de façon analytique dans des cas simples, notamment celui d'une encoche rectangulaire semi-fermée [SS63]. Nous proposons ici le calcul de coefficients de pondérations à appliquer à la résistance et la perméance rotoriques afin de prendre en

compte l'effet de peau qui va dépendre du glissement de la machine. Nous nous plaçons en configuration de rotor à cage à encoches profondes en nous limitant à un travail au premier harmonique. Ainsi, les courants se répartissent sur une épaisseur de peau δ dont l'expression s'écrit, en notant ω_r la pulsation des courants rotorique :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma_a \mu_0 \omega_r}} \quad (\text{F.13})$$

Les équations de Maxwell, ainsi que les relations valables dans l'encoche sont présentés ensuite :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J} \quad \overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \vec{E} = \rho \vec{J} \quad \vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (\text{F.14a})$$

ce qui nous donne

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{J} = -\mu_0 \sigma_a \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (\text{F.14b})$$

Nous présentons à la Figure F.2 les conventions de placement des axes pour les calculs suivants. Nous supposons que la machine est infiniment longue, ce qui permet de simplifier l'écriture de la densité de courant et du champ magnétique : $J = J_z(x)$ et $H = H_y(x)$ que nous écrivons sous forme complexe en prenant des grandeurs sinusoïdales de pulsation ω_r , en notant φ_J et φ_H les phases des deux grandeurs et t le temps.

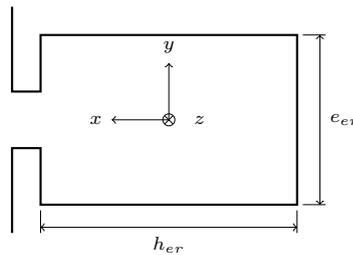


Figure F.2 – Définition des axes pour le calcul de l'effet de peau sur la résistance et la perméance de fuites de l'encoche.

$$\overline{J_z}(x) = J_z(x) e^{j(\omega_r t - \varphi_J)} \quad \overline{H_y}(x) = H_y(x) e^{j(\omega_r t - \varphi_H)} \quad (\text{F.15})$$

En l'injectant ceci dans les équations de Maxwell (F.14a), et en éliminant dans un premier temps \overline{J}_z , nous obtenons :

$$\frac{d^2 \overline{H}_y(x)}{dx^2} = j\omega_r \mu_0 \sigma_a \overline{H}_y(x) \quad (\text{F.16a})$$

en posant $\beta = \frac{1+j}{\delta}$, la solution s'écrit donc sous la forme :

$$\overline{H}_y(x) = \overline{A}_1 \sinh(\beta x) + \overline{A}_2 \cosh(\beta x) \quad (\text{F.16b})$$

les conditions limites donnent ensuite

$$\overline{H}_y(x) = \overline{A}_1 \sinh(\beta x) \quad (\text{F.16c})$$

De même, nous obtenons pour la densité de courant la solution :

$$\overline{J}_z(x) = \overline{A}_1 \beta \cosh(\beta x) \quad (\text{F.16d})$$

or le courant total traversant la barre s'écrit

$$\overline{I} = e_{er} \int_0^{h_{er}} \overline{J}_z dx \quad (\text{F.16e})$$

d'où l'expression de la constante :

$$\overline{A}_1 = \frac{\overline{I}}{e_{er} \sinh(\beta h_{er})} \quad (\text{F.16f})$$

Ce qui nous donne finalement l'expression du champ magnétique et de la densité de courant :

$$\overline{H}_y(x) = \frac{\overline{I}}{e_{er}} \frac{\sinh(\beta x)}{\sinh(\beta h_{er})} \quad \overline{J}_z(x) = \frac{\overline{I} \beta}{e_{er}} \frac{\cosh(\beta x)}{\sinh(\beta h_{er})} \quad (\text{F.17})$$

Nous supposons que le courant $\overline{J}_z(x)$ induit dans les barres est identique même lorsque nous fermons les barres avec l'anneau de court-circuit. En utilisant le fait que $2 |\cosh(\beta x)| = \cosh\left(\frac{2x}{\delta}\right) + \cos\left(\frac{2x}{\delta}\right)$ et que $2 |\sinh(\beta x)| = \cosh\left(\frac{2x}{\delta}\right) - \cos\left(\frac{2x}{\delta}\right)$, le calcul de la puissance

dissipée dans une barre ainsi que celui de l'énergie magnétique stockée dans une barre nous donne :

$$P_{J_{1b}} = \frac{1}{\sigma_a} \int_{\text{barre}} |\overline{J}_z|^2 d\vartheta = \frac{1}{\delta \sigma_a e_{er}} \underbrace{\left[\frac{\sinh\left(\frac{2h_{er}}{\delta}\right) + \sin\left(\frac{2h_{er}}{\delta}\right)}{\cosh\left(\frac{2h_{er}}{\delta}\right) - \cos\left(\frac{2h_{er}}{\delta}\right)} \right]}_{r_{1b}} L_r I_r^2 \quad (\text{F.18a})$$

$$W_{f_{1b}} = \frac{1}{2} \int_{\text{barre}} \mu_0 |\overline{H}|^2 d\vartheta = \frac{\mu_0 L_a \delta}{4e_{er}} \underbrace{\left[\frac{\sinh\left(\frac{2h_{er}}{\delta}\right) - \sin\left(\frac{2h_{er}}{\delta}\right)}{\cosh\left(\frac{2h_{er}}{\delta}\right) - \cos\left(\frac{2h_{er}}{\delta}\right)} \right]}_{\mathcal{P}_{1b}} I_r^2 \quad (\text{F.18b})$$

La comparaison avec les expressions de la résistance et de la perméance équivalente aux fuites d'une barre sans effet de peau données respectivement (F.6) et (F.8a), nous donne les coefficients d'effet de peau suivants :

$$k_{pr} = \frac{h_{er}}{\delta} \left[\frac{\sinh\left(\frac{2h_{er}}{\delta}\right) + \sin\left(\frac{2h_{er}}{\delta}\right)}{\cosh\left(\frac{2h_{er}}{\delta}\right) - \cos\left(\frac{2h_{er}}{\delta}\right)} \right] \quad k_{p\mathcal{P}} = \frac{3\delta}{2h_{er}} \left[\frac{\sinh\left(\frac{2h_{er}}{\delta}\right) - \sin\left(\frac{2h_{er}}{\delta}\right)}{\cosh\left(\frac{2h_{er}}{\delta}\right) - \cos\left(\frac{2h_{er}}{\delta}\right)} \right] \quad (\text{F.19})$$

Nous appliquons ces coefficients à la résistance et la perméance de fuites rotoriques ramenées au stator et supposons que leur domaine de validité reste valable dans le cas des géométries d'encoches rencontrées dans nos optimisations.

Modélisation thermique de la machine asynchrone triphasée

Dans cette annexe sont regroupées les expressions des résistances thermiques intervenant dans la modélisation thermique de la machine asynchrone utilisée au Chapitre 5, section §1.4 page 154. Le schéma équivalent électrique est proposé à la Figure 5.4 page 156.

1. Conduction radiale dans la culasse statorique

En notant λ_f la conductivité thermique du fer, L_a la longueur active de la machine, D_{fs} le diamètre de fond d'encoche, D_{es} le diamètre extérieur statorique et D_{cs} le diamètre moyen de culasse statorique nous avons [BCLP03] :

$$\mathcal{R}_{cs1} = \frac{1}{2\pi\lambda_f L_a k_{lam}} \ln\left(\frac{D_{cs}}{D_{fs}}\right) \quad \mathcal{R}_{cs2} = \frac{1}{2\pi\lambda_f L_a k_{lam}} \ln\left(\frac{D_{es}}{D_{cs}}\right) \quad (\text{G.1})$$

2. Conduction à l'interface entre la culasse et le carter

Le fer du circuit magnétique présente un état de surface rugueux du fait d'une construction par empilement de tôles et le carter du fait d'un moulage brut. La résistance thermique de conduction à leur interface est affectée par le processus d'assemblage de la machine

asynchrone et plus spécifiquement l'insertion des parties actives dans le carter. Le carter, préalablement porté à haute température est enfilé sur l'empilage de tôles. Le serrage est donc assuré par le refroidissement de l'aluminium. La différence de température occasionnée par les aspérités de contact entre le carter et le circuit magnétique, les impuretés résiduelles et l'air emprisonné est modélisée par une conductance thermique équivalente surfacique.

La conductance surfacique de contact dans ce type d'assemblage varie avec le matériau constitutif du carter ainsi qu'avec la puissance du moteur. Des études antérieures sur les machines électriques nous permettent d'estimer la valeur de la conductivité thermique surfacique équivalente, noté $\lambda_{cs,c}^s$, à $1500 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ [Tri04] correspondant aux caractéristiques moyennes de machines modélisées dans nos travaux. Ainsi nous écrivons l'expression de la résistance thermique de conduction de l'interface entre le circuit magnétique statorique et le carter :

$$\mathcal{R}_{cs,c} = \frac{1}{\pi \lambda_{cs,c}^s L_a k_{lam} D_{es}} \quad (\text{G.2})$$

3. Conduction radiale dans les dents statoriques

Cette partie de la machine est assimilée à un cylindre dont la longueur axiale équivalente est pondérée du pourcentage volumique des dents sur le volume total représenté par les encoches et les dents statoriques, appelé facteur de denture et noté k_{fc} [BCLP03]. Nous notons D_{is} le diamètre intérieur statorique, N_s le nombre d'encoches statorique, S_{es} la section d'encoche statorique, h_{is} et e_{is} respectivement la hauteur et l'épaisseur des isthmes d'encoches statoriques.

$$\mathcal{R}_d = \frac{1}{2\pi \lambda_f L_a k_{lam} k_{fc}} \ln \left(\frac{D_{fs}}{D_{is}} \right) \quad (\text{G.3a})$$

en utilisant l'expression du facteur de denture statorique

$$k_{fc} = \frac{\pi (D_{fs}^2 - D_{is}^2) - 4N_s (S_{es} + h_{is}e_{is})}{\pi (D_{fs}^2 - D_{is}^2)} \quad (\text{G.3b})$$

4. Conduction entre le bobinage et les encoches statoriques

L'interface entre le bobinage et le circuit magnétique statorique se fait par l'intermédiaire d'une feuille d'isolant assurant la protection électrique des conducteurs. Cet isolant est suffisamment rigide pour permettre de modéliser la liaison thermique entre le bobinage et le circuit magnétique par une seule conductance thermique.

Un isolant en mylar d'une épaisseur de 0,34 mm (d'une conductivité de $0,15 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$) entouré de deux lames d'air d'épaisseur 0,1 mm (de conductance thermique surfacique estimée à $250 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$) se modélise par une conductance surfacique de contact équivalente, notée $\lambda_{b,cs}^s$ de $96 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ [Tri04]. Ainsi, en notant h_{es} la hauteur d'encoche statorique, nous avons :

$$\mathcal{R}_{b,cs} = \frac{1}{\lambda_{b,cs}^s L_a k_{lam} \left(e_{is}(2 + \pi) + 2\sqrt{(h_{es} - h_{is} - e_{is})^2 + \frac{1}{4}e_{is}^2} \right)} \quad (\text{G.4})$$

5. Conduction au sein du bobinage statorique

Le bobinage présente une structure complexe, hétérogène et légèrement variable d'une encoche à l'autre suivant la procédure de bobinage. Il représente de plus la contrainte thermique principale dans la conception de la machine. Plutôt que de considérer l'ensemble des conducteurs de chaque encoches séparément, notre démarche de modélisation assimile le bobinage à un matériau homogène de conductivité et de capacité thermique équivalentes. Différentes études menées en fonction de la position des conducteurs dans l'encoche et du rapport de leur diamètre sur la distance les séparant ont permis d'estimer une valeur équivalente de conductivité pour chaque bobinage de machine [Roy83]. Dans une configuration typique comme celle que nous modélisons dans nos travaux, une valeur de conductivité thermique équivalente, notée λ_b , de $0,7 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ semble appropriée [Tri04]. Il s'agit d'une conductivité radiale, la résistivité axiale étant négligée dans cette étude.

En supposant les pertes Joule uniformément réparties dans le bobinage équivalent, nous savons que le point présentant la température maximale se situe au centre bas de l'encoche. Dans la configuration d'encoches infiniment profondes et rectangulaires, les isothermes sont verticales et disposées de part et d'autre de ce point. Dans le cas d'encoches fermées toujours rectangulaires, nous obtenons des courbes paraboliques entourant le point de température maximale. Nous simplifions ces courbes en les approximant par des rectangles, comme représenté à la Figure G.1. Nous modélisons pour ce calcul uniquement des encoches rectangulaires de section et de profondeur équivalentes à celles du modèle géométrique présenté au Chapitre 5, Figure 5.1 page 147.

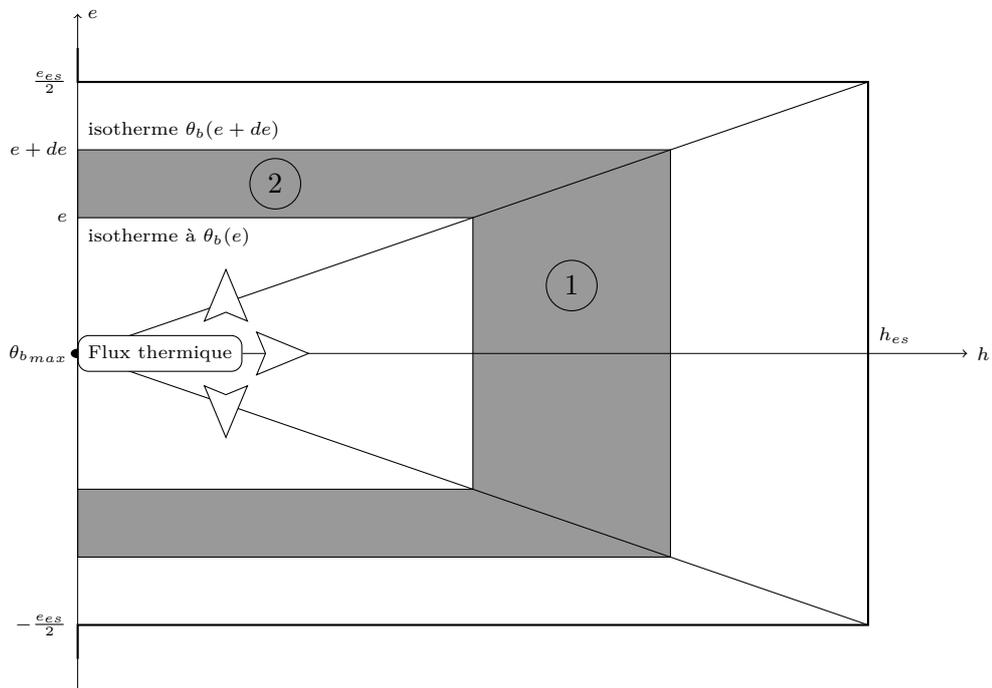


Figure G.1 – Flux radiaux et lignes isothermes dans la modélisation thermique d'une encoche statorique de forme rectangulaire.

La réduction des flux thermiques aux deux directions suivant la hauteur et l'épaisseur de l'encoche (l'isthme d'encoche n'est pas représenté à la Figure G.1) permet la mise en parallèle des deux résistances élémentaires associées aux zones notées 1 et 2. Celles-ci se calculent par intégration de résistances de conductions élémentaires avec pour conductivité thermique radiale équivalente du bobinage λ_b définie ci-dessus. Il convient au final de mettre en parallèle les résistances de chaque encoche statorique, ce qui donne :

$$\mathcal{R}_b = \frac{h_{es}e_{es}}{12\lambda_b N_s (h_{es}^2 + e_{es}^2) L_a k_{lam}} \quad (\text{G.5})$$

6. Conduction entre les têtes de bobines et le carter

Cette résistance thermique modélise le flux thermique entre les têtes de bobines et le carter. Dans cette partie interne au carter, du côté opposé à la ventilation, la vitesse de circulation de l'air est faible, permettant de ne considérer qu'un phénomène de conduction à travers l'air. Nous supposons que cette conduction se fait sur l'épaisseur des flasques de protection des têtes de bobines [BCLP03]. Nous avons, en définissant la conductivité de l'air λ_0 , en posant h_{es} l'épaisseur des têtes de bobines :

$$\mathcal{R}_{b,c} = \frac{1}{2\pi\lambda_0 h_{es}} \ln\left(\frac{D_{es}}{D_{fs}}\right) \quad (\text{G.6})$$

7. Conduction radiale dans le circuit magnétique rotorique

En notant D_{fr} le diamètre de fond d'encoche rotorique et D_{ir} le diamètre intérieur rotorique, nous avons :

$$\mathcal{R}_{cr} = \frac{1}{2\pi\lambda_f L_a k_{lam}} \ln\left(\frac{D_{fr}}{D_{ir}}\right) \quad (\text{G.7})$$

8. Conduction entre la cage et le circuit magnétique rotorique

La cage d'écureuil est réalisée par coulage d'aluminium dans les encoches rotoriques. Nous pouvons supposer, par ce procédé, que la présence d'air est suffisamment limitée à l'interface pour considérer le contact comme bon. Nous négligeons donc la résistance thermique de conduction devant les grandeurs mises en jeu dans la modélisation thermique.

9. Conduction entre la culasse rotorique et l'arbre

L'arbre est enfilé dans le rotor préalablement porté à haute température. L'ensemble est ensuite refroidit brutalement, permettant de considérer le contact entre ces deux matériaux

comme bon. Dans ces conditions, nous choisissons une valeur de la conductance thermique surfacique, notée $\lambda_{r,a}^s$ de $500 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ [Tri04]. Ainsi, nous avons :

$$\mathcal{R}_{cr,a} = \frac{1}{\pi \lambda_{r,a}^s L_a k_{lam} D_{ir}} \quad (\text{G.8})$$

10. Conduction dans les roulements

Les roulements sont constitués de deux bagues circulaires en mouvement relatif séparées par une rangée de billes. Les dimensions des roulements dépendant du diamètre intérieur rotorique, leur modélisation doit prendre en compte ces variations de dimensions caractéristiques. Nous considérons que le transfert de chaleur se fait par conduction à travers les bagues et les billes, sans prendre en compte de transfert à travers la graisse entourant les billes. Nous négligeons de plus les pertes dissipées par frottement dans les roulements.

La caractérisation thermique des transferts thermiques dans les roulements est complexe, mais aboutit cependant à des valeurs moyennes de conductances. Nous présentons dans la Table G.1 une estimation des conductances apparaissant dans le transfert thermique d'un roulement de type 6206, utilisé dans la mécanique des machines électriques. Les ordres de grandeurs des différentes conductances nous permettent de ne conserver dans notre modélisation que les transferts thermiques au contact entre bague et billes. la résistance thermique \mathcal{R}_r est modélisée proportionnelle au diamètre intérieur du roulement. Le coefficient est estimé à partir des conductances thermique des enroulement de la série 6200.

Table G.1 – *Conductances thermique estimées d'un enroulement de type 6206 [Tri04].*

Description	Valeur, W.K^{-1}
Contact bague intérieure, billes	0,069
Contact billes, bague extérieure	0,073
Billes	0,523
Bague intérieure	19,982
Bague extérieure	35,396

11. Conduction entre l'arbre et les roulements

Les roulements sont montés serrés sur l'arbre. Nous considérons donc le contact comme thermiquement non résistif.

12. Conduction entre les roulements et les flasques

Des évidements sont usinés dans les flasques afin de recevoir les roulements. L'assemblage des deux composants se fait par exemple au maillet. Les roulements sont donc en contact glissant avec les flasques. Nous choisissons d'affecter à ce contact une conductance surfacique, notée $\lambda_{r,f}^s$, de $250 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ [Tri04]. Nous avons :

$$\mathcal{R}_{r,f} = \frac{1}{\pi \lambda_{r,f}^s e_r D_r} \quad (\text{G.9})$$

13. Conduction axiale dans l'arbre

Cette résistance thermique se décompose en deux parties. La première représente la partie de l'arbre sous la culasse rotorique (où nous considérons que le flux thermique se sépare en deux) et la seconde la partie de l'arbre à l'air libre. Nous avons ainsi [BCLP03] :

$$\mathcal{R}_a = \left(\frac{L_a k_{lam}}{2\pi \lambda_f D_{ir}^2} \right) + \left(\frac{e_a + 2e_f + e_v}{\pi \lambda_f D_{ir}^2} \right) \quad (\text{G.10})$$

14. Conduction entre les flasques et le carter

Les flasques se glissent sur le pourtour du carter préalablement usiné. Nous choisissons d'affecter à cet assez mauvais contact une conductance surfacique, notée $\lambda_{f,c}^s$, de $250 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ [Tri04]. En notant e_c l'épaisseur du carter nous avons :

$$\mathcal{R}_{f,c} = \frac{2}{\pi \lambda_{r,f}^s \left((D_{es} + 2e_c)^2 - D_{es}^2 \right)} \quad (\text{G.11})$$

15. Transferts thermiques dans l'entrefer

15.1 Pertes dues au cisaillement de l'air dans l'entrefer

Les pertes dues au cisaillement de l'air dans l'entrefer sont négligeables dans la fourchettes de dimensions et de vitesses de rotations considérées dans nos optimisations. Nous en proposons toutefois le calcul [Vra68], qui se fait sous les hypothèses suivantes :

- pas de flux axial dans l'entrefer,
- l'épaisseur de l'entrefer est faible devant celle du diamètre moyen d'entrefer,
- le fluide considéré (ici l'air dans l'entrefer) est homogène et ne présente pas de différences de pression le long de l'entrefer,
- l'écoulement est laminaire, c'est-à-dire que la distribution de vitesse est linéaire entre le stator, où elle est nulle, et le rotor, où elle est maximale,
- la machine est à pôles lisses.

Le rotor, soumis à une force de norme F , avance à une vitesse ν par rapport au stator. Une force égale et opposée est appliquée au stator afin qu'il reste fixe. La contrainte de pression de cisaillement est définie comme la force par unité de surface dF/dS et la déformation de cisaillement est définie comme le quotient du déplacement dû à la contrainte sur l'épaisseur de la dimension transverse (la hauteur d'entrefer h_e). Dans un solide, la contrainte de cisaillement est proportionnelle à la déformation, mais dans un fluide à écoulement laminaire elle est proportionnelle à son taux de variation. La déformation est donc égale à $\nu t/h_e$ avec ν la vitesse tangentielle du rotor et t le temps. Le taux de variation de cette déformation s'écrit :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\nu t}{h_e} \right) = \frac{\nu}{h_e} \quad \text{d'où} \quad \frac{dF}{dS} \propto \frac{\nu}{h_e} = \mu \frac{\nu}{h_e} \quad (\text{G.12})$$

Nous définissons μ comme la viscosité dynamique du fluide dans l'entrefer. En supposant que la force est constante sur la surface d'entrefer, l'intégration de l'expression précédente nous donne, en notant Ω la vitesse angulaire mécanique du rotor :

$$F = \frac{\pi \mu D_{er}^2 \Omega L_a k_{lam}}{2h_e} \quad (\text{G.13})$$

il vient ensuite l'expression de la puissance dissipée par le cisaillement de l'air dans l'entrefer.

$$P_e = \frac{FD_{er}\Omega}{2} = \frac{\pi\mu D_{er}^3\Omega^2 L_a k_{lam}}{4h_e} \quad (\text{G.14})$$

Nous définissons ensuite le nombre de Reynolds R_e pour une géométrie de cylindres concentriques comme un rapport sans dimension comparant la viscosité cinématique et la vitesse d'écoulement du fluide air dans l'entrefer. Nous exprimerons la viscosité cinématique de l'air d'entrefer comme le rapport de sa viscosité dynamique sur sa masse volumique, notée ρ_0 .

$$R_e = \frac{2\rho_0\nu h_e}{\mu} = \frac{D_{er}\Omega\rho_0 h_e}{\mu} \quad (\text{G.15})$$

Nous définissons enfin le coefficient de friction de pelliculaire C_d tel que $C_d = 2/R_e$. Notons que lorsque le flux n'est pas laminaire dans l'entrefer, la relation entre le nombre de Reynolds et le coefficient de friction devient non linéaire, il faut ainsi utiliser la relation empirique (G.16) les valeurs des coefficients étant mesurées expérimentalement [Vra68].

$$\frac{1}{\sqrt{C_d}} = 2,04 + 1,768 \ln(R_e\sqrt{C_d}) \quad (\text{G.16})$$

La définition de C_d n'est pas utile dans le cas d'un écoulement laminaire. Par contre, dans le cas d'un écoulement turbulent, le calcul de C_d introduit une non linéarité par l'expression (G.16) et représentée à la Figure G.2.

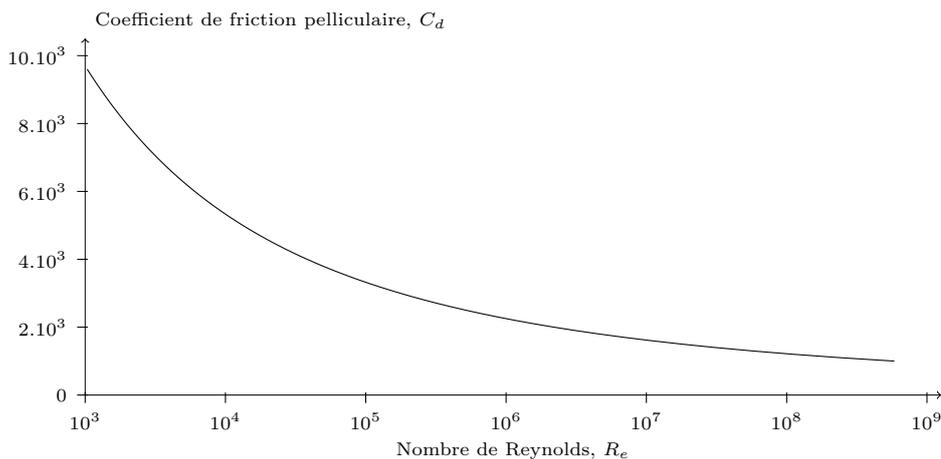


Figure G.2 – Evolution du coefficient de friction pelliculaire en fonction du nombre de Reynolds en régime turbulent.

Nous pouvons alors écrire l'expression finale de la puissance dissipée en cisaillement de l'air dans l'entrefer.

$$P_e = \frac{\pi D_{er}^4 \Omega^3 L_a k_{lam} \rho_0 C_d}{8} \quad (\text{G.17})$$

15.2 Convection entre le stator et le rotor

L'écoulement dans l'espace annulaire délimité par les deux surfaces d'entrefer peut être laminaire, turbulent ou même tourbillonnaire suivant la vitesse de rotation du rotor et la hauteur d'entrefer. Nous définissons dans ce cas deux nombres de Reynolds. Le premier est associé à la rotation d'une des surfaces et le second associé au mouvement propre de l'air d'entrefer, de vitesse moyenne v [Roy83]. En notant D_e le diamètre moyen d'entrefer, nous avons :

$$\begin{cases} \mu R_{er} = \rho_0 \left(\Omega \frac{D_e}{2} \right) h_e & \text{associé à la rotation} \\ \mu R_{ef} = \rho_0 v h_e & \text{associé au fluide} \end{cases} \quad (\text{G.18})$$

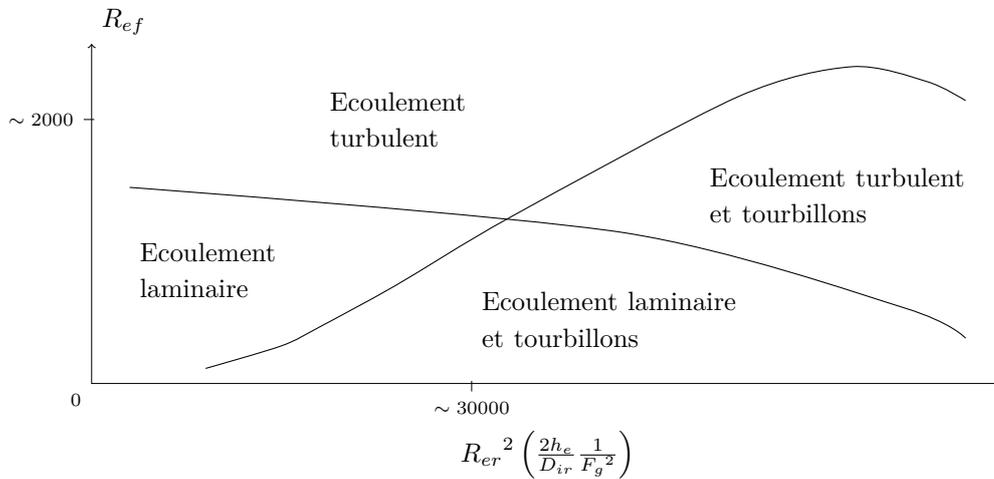


Figure G.3 – Régimes d'écoulements dans l'entrefer en fonction des nombres de Reynolds associés aux deux mouvements en présence dans l'entrefer : rotation du rotor et circulation du fluide entre le rotor et le stator [Roy83].

Suivant le rapport des nombres de Reynolds, proposé à la Figure G.3, nous pouvons établir la nature de l'écoulement ayant lieu dans l'entrefer. Notons que les limites entre les différentes régions dépendent de la largeur relative de l'espace annulaire, notée ϵ ainsi que

d'un facteur correctif, noté F_g lorsque la largeur relative de l'espace annulaire est faible. Nous définissons ainsi :

$$\epsilon = \ln \left(\frac{D_{is}}{D_{er}} \right) \quad F_g = 1 - \epsilon \quad (\text{G.19})$$

15.2.1 Cas d'un écoulement axial inexistant ou négligé

Dans ce cas, la chaleur quittant l'une des surfaces est entièrement reçue par l'autre, en régime établi. Le coefficient de transfert convectif entre les deux surfaces et l'air, noté h_i (identique pour les deux surfaces) est alors obtenu à partir d'une relation de la forme suivante, en notant A , A_1 et A_2 des constantes explicitées dans la Table G.2, N_u le nombre de Nusselt (comparaison des échanges par convection et par conduction) P_r le nombre de Prandtl (comparaison entre déplacement de chaleur, diffusivité, et déplacement de matière, viscosité cinématique) et C_0^m la chaleur massique de l'air :

$$N_u = A \left[R_{er} \left(\frac{2h_e}{D_{er}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{A_1} P_r^{A_2} \text{ avec } \begin{cases} \lambda_0 N_u = 2h_i h_e \\ \lambda_0 P_r = \mu C_0^m \end{cases} \quad (\text{G.20})$$

Table G.2 – Constantes pour la détermination du coefficient d'échange convectif dans un espace annulaire [Roy83].

A	A_1	A_2	Domaine de validité
2,0	0	0	$0 < R_{er} \left(\frac{2h_e}{D_{er}} \right)^{\frac{1}{2}} \leq 41$
0,212	0,63	0,27	$41 < R_{er} \left(\frac{2h_e}{D_{er}} \right)^{\frac{1}{2}} \leq 10^2$
0,386	0,5	0,27	$10^2 < R_{er} \left(\frac{2h_e}{D_{er}} \right)^{\frac{1}{2}} \leq 10^3$

Si les deux cylindres ne sont pas lisses mais supportent des isthmes d'encoche, un coefficient correctif peut être appliqué à l'équation (G.20) afin de tenir compte des perturbations introduites par ces irrégularités de surface. Cet affaiblissement est d'environ 10 % pour une surface encochée et de 20 % pour deux surfaces. Notons que cet affaiblissement est négligeable en régime turbulent.

L'expression du nombre de Nusselt nous donne la valeur du coefficient d'échange thermique h_i , puis nous avons :

$$\mathcal{R}_{s,e} = \frac{1}{\pi h_i L_a k_{lam} D_{is}} \quad \mathcal{R}_{e,r} = \frac{1}{\pi h_i L_a k_{lam} D_{er}} \quad (\text{G.21})$$

Dans le cas où les nombre de Reynolds R_{er} est suffisamment faible (inférieur à la valeur critique donnée dans la Table G.2) nous pouvons considérer uniquement la conduction entre les deux surfaces statorique et rotorique (A_1 et A_2 sont nuls le nombre de Nusselt vaut deux). Dans ce cas les deux résistances thermiques $\mathcal{R}_{s,e}$ et $\mathcal{R}_{e,r}$ peuvent être remplacées par une seule résistance de conduction dans le cylindre d'air de l'entrefer :

$$\mathcal{R}_e = \frac{1}{2\pi\lambda_0 L_a k_{lam}} \ln \left(\frac{D_{is}}{D_{er}} \right) \quad (\text{G.22})$$

Ce résultat est notamment obtenu lors de mesures sur plusieurs moteurs asynchrone quatre pôles de puissance comprise entre 4 et 55 kW [BCLP03] et il s'agit aussi du cas de simulation rencontré le plus souvent dans nos optimisations. Dans un soucis de simplification de la modélisation thermique, nous limiterons notre estimation des échanges dans l'entrefer à ce cas de figure. Nous proposons cependant la modélisation nécessaire à mettre en œuvre dans le cas de la présence d'un écoulement non négligeable et de la rotation de la machine.

15.2.2 Cas d'un écoulement axial non négligeable

Sans rotation. Dans ce cas, la chaleur quittant une des surfaces est en grande partie cédée au fluide. En faisant l'hypothèse que la surface opposée est adiabatique, il est possible de déterminer deux coefficients d'échanges convectif forcé $h_{s,iF}$ et $h_{r,iF}$ spécifiques à la surface considérée, qui s'ajoutent au calcul du coefficient d'échange convectif naturel entre les deux surfaces et le fluide d'entrefer, h_i estimé précédemment.

Ces trois coefficients s'obtiennent à partir de définitions du nombre de Nusselt dérivées de l'équation (G.20). En introduisant un « facteur adiabatique » noté $k_{s,i}$ dans le cas du stator et $k_{r,i}$ dans le cas du rotor. Nous avons ainsi [Roy83] :

$$\begin{cases} N_{us} = AR_{ef}^{A_1} P_r^{A_2} \mathcal{F} \left(\frac{L_a k_{lam}}{2h_e} \right) (1 - k_{s,i}) & \text{pour le stator} \\ N_{ur} = AR_{ef}^{A_1} P_r^{A_2} \mathcal{F} \left(\frac{L_a k_{lam}}{2h_e} \right) (1 - k_{r,i}) & \text{pour le rotor} \end{cases} \quad (\text{G.23a})$$

et

$$N_u = \begin{cases} N_{us} \left(\frac{\epsilon D_{is}}{2h_e} \right) \left[1 + k_{r,i} + \frac{D_{is}}{D_{er}} (1 + k_{s,i}) \right]^{-1} \\ N_{ur} \left(\frac{\epsilon D_{er}}{2h_e} \right) \left[1 + k_{s,i} + \frac{D_{er}}{D_{is}} (1 + k_{r,i}) \right]^{-1} \end{cases} \quad (\text{G.23b})$$

avec la fonction \mathcal{F} définie comme suit :

$$\mathcal{F}(\ell) = \begin{cases} \ell^{-\frac{2}{5}} & \text{en régime laminaire} \\ 1 + \ell^{-\frac{1}{2}} & \text{en régime turbulent} \end{cases} \quad (\text{G.23c})$$

Les constantes A , A_1 et A_2 sont regroupées dans la Table G.2 et des abaques permettant d'estimer les « facteurs adiabatiques » proposés à la Figure G.4. A partir de la définition du nombre de Nusselt, rappelée à l'équation (G.20) nous obtenons les valeurs des coefficients d'échanges convectifs forcés $h_{s,iF}$ et $h_{r,iF}$ ainsi que le coefficient d'échange convectif naturel h_i . Notons que ces résultats sont peu affectés par la présence d'isthmes d'encoches.

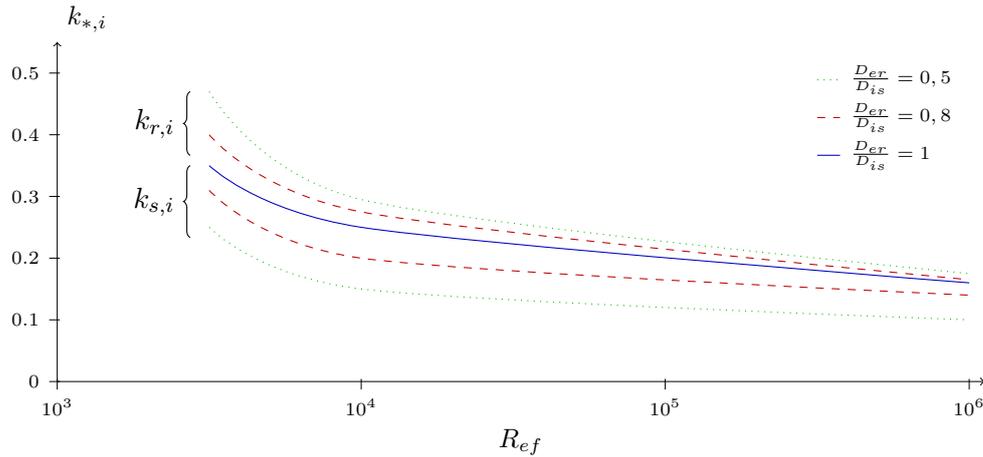


Figure G.4 – Facteur adiabatique pour les échanges thermiques en espaces annulaires [Roy83].

Avec rotation. Lorsqu'il y a rotation du rotor, les coefficient d'échanges convectifs naturels peuvent être déduits des équations (G.23b) et (G.20). Nous avons ainsi [Roy83] :

$$Nu = \begin{cases} A \left[R_{er} \left(\frac{2h_e}{D_{is}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{A_1} P_r^{A_2} & \text{pour le stator} \\ A \left[R_{er} \left(\frac{2h_e}{D_{er}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{A_1} P_r^{A_2} & \text{pour le rotor} \end{cases} \quad (\text{G.24})$$

Si les deux valeurs de coefficient d'échange convectif obtenues dans ce cas sont trop éloignées, la plus grande est retenue. Si ces deux valeurs sont proches, la valeur finale est obtenue par le calcul suivant :

$$h_i = \sqrt{\underbrace{h_i^2}_{\text{sans rotation}} + \underbrace{h_i^2}_{\text{sans écoulement axial}}} \quad (\text{G.25})$$

Dans tous les cas, les coefficients d'échange convectifs forcés $h_{s,i}$ et $h_{r,i}$ sont déduits de l'expression suivante, tirée de l'équation (G.23a) :

$$\begin{cases} N_{us} = N_u \left(\frac{2h_e}{\epsilon D_{is}} \right) \left[1 + k_{r,i} + \frac{D_{is}}{D_{er}} (1 + k_{s,i}) \right] \\ N_{ur} = N_u \left(\frac{2h_e}{\epsilon D_{er}} \right) \left[1 + k_{s,i} + \frac{D_{er}}{D_{is}} (1 + k_{r,i}) \right] \end{cases} \quad (\text{G.26})$$

Résistances thermiques. De façon similaire à l'équation (G.21), nous avons dans le cas d'un écoulement axial non négligeable les expressions des résistances thermiques suivantes :

$$\mathcal{R}_{s,e} = \frac{1}{\pi h_i L_a k_{lam} D_{is}} + \frac{1}{\pi h_{s,iF} L_a k_{lam} D_{is}} \quad \mathcal{R}_{e,r} = \frac{1}{\pi h_i L_a k_{lam} D_{er}} + \frac{1}{\pi h_{r,iF} L_a k_{lam} D_{er}} \quad (\text{G.27})$$

16. Convection entre le carter et l'air ambiant

La machine asynchrone est fermée et équipée d'un ventilateur enveloppé par un déflecteur. La convection forcée de l'air sur les ailettes du carter s'éloigne des configurations thermiques modélisées ici. La surface du carter n'est pas uniformément couverte d'ailettes, ce qui génère un profil de vitesse et un champ de température hétérogène sur le pourtour du carter, à section axiale donnée. Souhaitant intégrer la convection entre le carter et l'air ambiant dans le modèle modale, nous supposons que la distribution du coefficient d'échange est similaire à celle d'un écoulement parallèle à une plaque plane chauffée uniformément en régime laminaire. Ainsi la valeur du coefficient convectif est donnée par l'expression du nombre de Nusselt donnée à l'équation (G.28a) [BCLP03]. Celle-ci dépend du nombre de Reynolds, exprimé dans cette configuration géométrique en notant v_{air} la vitesse de l'air à la surface du carter, ainsi que du nombre de Prandtl dont l'expression est rappelée à l'équation (G.20), page 261. Nous exprimons ensuite la résistance thermique de transfert convectif en considérant l'ensemble de la surface extérieur du carter incluant les flasques :

$$h_{0F} = \frac{N_u \lambda_0}{L_a k_{lam} + 2e_{tb}} \text{ avec } \begin{cases} N_u = \frac{2}{3} R_e^{\frac{1}{2}} P_r^{\frac{1}{3}} & \text{si } R_e < 10^4 \\ N_u = \frac{2}{30} R_e^{\frac{3}{4}} P_r^{\frac{1}{3}} & \text{si } R_e \geq 10^4 \end{cases} \quad (\text{G.28a})$$

avec l'expression du nombre de Reynolds dans cette configuration géométrique :

$$R_e = \frac{(L_a k_{lam} + 2e_{tb}) v_{air} M_0^m}{\mu} \quad (\text{G.28b})$$

puis vient la résistance thermique :

$$\mathcal{R}_{c,0} = \frac{2}{\pi h_{0F} (D_{es} + 2e_c) (L_a k_{lam} + 2e_{tb})} \quad (\text{G.28c})$$

La vitesse de l'air à la surface du carter varie suivant la position axiale considérée et suivant la fréquence de rotation du moteur (la vitesse de rotation de la ventilation est directement proportionnelle à la vitesse de rotation mécanique du rotor). Nous proposons à la Figure G.5 une mesure expérimentale sur un moteur asynchrone quatre pôles de 4 kW avec refroidissement par ventilation externe.

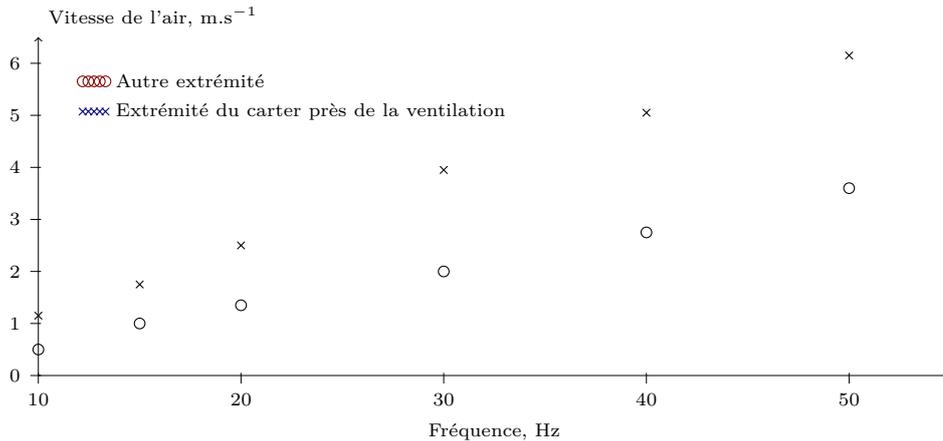


Figure G.5 – Vitesse expérimentale de l'air à la surface du carter aux deux extrémités axiales du carter en fonction de la fréquence d'alimentation, sans charge, pour un moteur asynchrone quatre pôles de 4 kW [BCLP03].

Le modèle thermique utilisé dans les optimisations ne prenant pas en compte la distribution axiale de température, nous moyennons cette vitesse afin de calculer la résistance thermique $\mathcal{R}_{c,0}$.

17. Convection entre l'air interne et les flasques

En supposant que le coefficient d'échange thermique convectif est h_i estimé à la section §15 page 258, nous avons, en modélisant la surface interne des flasques par des cylindres plats :

$$\mathcal{R}_{i,f} = \frac{2}{\pi h_i (D_{es}^2 - D_{ir}^2)} \quad (\text{G.29})$$

18. Convection entre les têtes de bobines et l'air intérieur

En supposant que le coefficient d'échange thermique convectif est h_i estimé à la section §15 page 258, nous avons, en modélisant la surface des têtes de bobines sans prendre en compte la partie supérieure qui donne la résistance thermique de conduction $\mathcal{R}_{b,c}$:

$$\mathcal{R}_{b,i} = \frac{2}{\pi h_i \left[4h_{es} (D_{is} + 2h_{is}) + (D_{fs}^2 - (D_{is} + 2h_{is})^2) \right]} \quad (\text{G.30})$$

Bibliographie

- [AAL05] A.S.G. Andrée, D.R. Andersson et J. Liu: *Significance of intermediate production processes in life cycle assessment of electronic products assessed using a generic compact model*.
Journal of Cleaner Production, 13 :1269–1279, 2005.
- [AAR02] R.U. Ayres, L.W. Ayres et I. Rade: *The Life Cycle of Copper*.
rapport technique, Mining, Minerals and Sustainable Development, 2002.
- [ABB00] *DMI type DC machine-180-471 kW power range*.
ABB Environmental Product Declaration, 2000.
- [ABB01a] *Converter Module DCS 400*.
ABB Environmental Product Declaration, 2001.
- [ABB01b] *Power transformer TrafoStar 500 MVA*.
ABB Environmental Product Declaration, 2001.
- [ABB02] *AC Low voltage flameproof motor, type M3JP 180*.
ABB Environmental Product Declaration, 2002.
- [ABB03a] *Power Transformer 250 MVA*.
ABB Environmental Product Declaration, 2003.
- [ABB03b] *Power Transformers 40/50 MVA (ONAN/ONAF)*.
ABB Environmental Product Declaration, 2003.
- [ABB03c] *Large Distribution Transformer 10 MVA (ONAN)*.
ABB Environmental Product Declaration, 2003.
- [ABB04] *DriveIT High voltage process performance cast iron motor type M3BM 355*.
ABB Environmental Product Declaration, 2004.
- [ABB07] *Moteurs   hauts rendements. Produits d’efficacité énergétique*.
Revue ABB, 2007.

- [AC99] A. Azapagic et R. Clift: *Life cycle assessment and multiobjective optimisation*. Journal of Cleaner Production, 13 :135–143, 1999.
- [ADE] *Site internet de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie*. <http://www.ademe.fr/>, visité le 1^{er} septembre 2009.
- [ADE07] *La méthode Bilan Carbone. Comptabiliser les émissions de gaz à effet de serre*. Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie, 2007.
- [ADE09] *Bâtiments basse consommation. L'ADEME dresse un 1^{er} bilan prometteur*. Ademe, communiqué de Presse 19 juin, 2009.
- [AFN98] *X 30-110 (8-83). Matière premières et énergie, vocabulaire et méthodologie de la détermination du contenu énergétique, équivalences énergétiques*. Association Française de Normalisation, 1998.
- [AFN02] *ISO 19011 : 2002-10-01. Lignes directrices pour l'audit des systèmes de management de la qualité et/ou de management environnemental*. Association Française de Normalisation, 2002.
- [Ahm06] H. Ben Ahmed: *Habilitation à diriger les recherches*. Ecole Normale Supérieure de Cachan antenne de Bretagne, 2006.
- [AIE07] *Key World Energy Statistics*. Agence Internationale de l'Energie, 2007.
- [Alg70] P.L. Alger: *Induction machines, their behavior and uses*. Gordon and Breach Science Publishers, 1970.
- [ALR04] P. Agati, F. Lerouge et M. Rossetto: *Résistance des matériaux*. Dunod Sciences Sup, 2004.
- [Als00] E.A. Alsema: *Environmental life cycle assessment of solar home systems*. rapport technique, Departement of Science Technology and Society, Utrecht University, 2000.
- [AM98] M.A. Aguado-Monsonet: *The environmental impact of photovoltaic technology*. rapport technique, European Commission - Joint Research Centre, 1998.
- [ARC02] *Product Data Sheets, C.27/4-6-7 Series*. Arcotronics, 2002.
- [Ath07] J. Atherton: *Declaration by the Metals Industry on Recycling Principles*. International Journal of Life Cycle Assessment, 12 :59–60, 2007.
- [Bar93] W. Barlow: *National prosperity : the role of the engineer*. rapport technique, The Royal Academy of Engineering, Zürich, 1993.
- [BBJ99] B. Butel-Bellini et M. Janin: *Ecoconception : état de l'art des outils disponibles*. Dans *Les Techniques de l'Ingénieur*, G6010. Editions Tissot, 1999.
- [BCLP03] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari et M. Pastorelli: *A simplified thermal model for variable-speed self-cooled industrial induction motor*. IEEE Transactions on Industry Applications, 39 :945–952, 2003.

- [BDD] *Site internet répertoriant les bases de données d'inventaire existantes.*
<http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/databaseList.vm>, visité le 1^{er} septembre 2009.
- [Ben98] E. Benetto: *Analyse du cycle de vie : Réalisation de l'inventaire.*
Dans *Les Techniques de l'Ingénieur*, G5510. Editions Tissot, 1998.
- [BH79] I. Boustead et G.F. Hancock: *Handbook of industrial energy analysis.*
Ellis Horwood Limited, Chichester, 1979.
- [BN01] I. Boldea et S.A. Nasar: *The Induction Machine Handbook.*
CRC Press, 2001.
- [BO97] R.P. Bouchard et G. Olivier: *Conception de moteurs asynchrones triphasés.*
Presses Internationales Polytechniques, 1997.
- [Bou04] J. Bouvet: *L'éco-conception pour les mécaniciens : comment concilier conception et environnement pour un développement durable.*
rapport technique, Centre Technique des industries Mécaniques, 2004.
- [BP0] *Site internet du logiciel Bilan Produit 2008.*
<http://www.ademe.fr/bilanproduit/>, visité le 1^{er} septembre 2009.
- [BPRB04] E. Benetto, E.C. Popovici, P. Rousseaux et J. Blondin: *Life cycle assessment of fossil CO₂ emissions reduction scenarios in coal-biomass based electricity production.*
Energy Conversion and Management, 45 :3053–3074, 2004.
- [BS97] J. Bonal et G. Séguier: *Entraînements électriques à vitesse variable, T1.*
Lavoisier, 1997.
- [BS05] E. Brun et F. Saillet: *Etat de l'art dans le domaine de l'éco-conception.*
rapport technique, Association Française de Normalisation, 2005.
- [CCE01] *Livre vert sur la politique intégrée des produits.*
Commission des Communautés Européennes, 2001.
- [CCf] *Site internet gouvernemental français sur le changement climatique.*
<http://www.effet-de-serre.gouv.fr/>, visité le 1^{er} septembre 2009.
- [CEA07] *Mémento sur l'énergie, energy handbook.*
Commissariat à l'Énergie Atomique, 2007.
- [CGM⁺05] P. Caseau, D. Gauthier, H. Mazéas, H. Lecouls, S. Sidoroff et N. Boeglin: *Les analyses de cycle de vie.*
rapport technique, Académie des Technologies, 2005.
- [Cha83] J. Chatelin: *Machines électriques. Volume 10 du traité d'électricité, d'électronique et d'électrotechnique.*
Presse Polytechnique Romande, 1983.
- [CIG] *Site internet du Conseil International des Grands Réseaux électriques.*
<http://www.cigre.org/>, visité le 1^{er} septembre 2009.

- [CM90] M. Cacciari et G.C. Montanari: *Probabilistic models for life prediction of insulating materials*.
Journal of Physics. D. Applied Physics, 23 :1592–1598, 1990.
- [CML] *Site internet de la méthode de catégorisation CML*.
<http://cml.leiden.edu/>, visité le 1^{er} septembre 2009.
- [COM] *Site internet du logiciel Comsol*.
<http://www.comsol.fr/>, visité le 1^{er} septembre 2009.
- [CRo] *Site internet du Club de Rome*.
<http://www.clubofrome.org/eng/home/>, visité le 1^{er} septembre 2009.
- [CVCF04] J. Cros, P. Viarouge, Y. Chalifour et J. Figueroa: *A new structure of universal motor using soft magnetic composites*.
IEEE Transactions on Industry Applications, 40 :75–82, 2004.
- [Deb82] J. Deberles: *L'aluminium dans les transformateurs de distribution*.
Revue du Génie Electrique, 1 :81–88, 1982.
- [Deb01] K. Deb: *Multi-Objective optimization using evolutionary algorithms*.
Wiley Interscience Series in Systems & Optimization, 2001.
- [DK04] P. Denholm et G.L. Kulcinski: *Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems*.
Energy Conversion and Management, 45 :2153–2172, 2004.
- [EB05] C. Espanet et J. Bignon: *Utilisation de l'optimisation pour rénover l'enseignement de la conception des machines électriques - description d'un travail pratique utilisant le logiciel ProDesign*.
Dans *CETISIS*, 2005.
- [EDI04] *Spatial differentiation in life cycle impact assessment. The EDIP2003 methodology (Guidelines from the Danish Environmental Protection Agency)*.
Institute for Product Development, Technical University of Denmark, 2004.
- [EIn01] *Eco-indicator 99, damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment*.
Product Ecology Consultants, 2001.
- [ELa] *Site internet sur les éco-labels français, de l'Agence Française de Normalisation, soutenu par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie*.
<http://www.ecolabels.fr/fr>, visité le 1^{er} septembre 2009.
- [EPA] *Site internet de l'Agence de Protection de l'Environnement américaine*.
<http://www.epa.gov/>, visité le 1^{er} septembre 2009.
- [EPS99] *A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000 - Models and data of the default method*.
Chalmers University of Technology, Environmental Systems Analysis, 1999.
- [EPS01] *Identification of significant environmental aspects and their indicators*.
Chalmers University of Technology, Environmental Systems Analysis, 2001.
- [FB07] A. Franzén et L. Bertling: *State of the art - life time modeling and management of transformers*.

- rapport technique, Royal Institute of Technology, KTH, 2007.
- [FED] *Site internet de la Fédération des Entreprises du Recyclage.*
<http://www.federec.org/>, visité le 1^{er} septembre 2009.
- [FEM] *D.C. Meeker, Finite Element Method Magnetics, Version 4.2.*
<http://femm.foster-miller.net>, visité le 1^{er} septembre 2009.
- [Fog99] A. Foggia: *Méthodes de calcul des inductances de fuites.*
Dans *Les Techniques de l'Ingénieur*, D3440. Editions Tissot, 1999.
- [GIE] *Site internet du GIEC.*
<http://www.ipcc.ch/>, visité le 1^{er} septembre 2009.
- [GIE07] *Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse.*
Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2007.
- [GJR04] S. Ghozzi, K. Jelassi et X. Roboam: *Energy Optimization of Induction motor Drives.*
Dans *IEEE ICIT*, 2004.
- [Gre95] B. Grehant: *Actionneurs tubulaires pour le bâtiment.*
Dans *Les Journées EEA*, 1995.
- [Gue07] T. Gueret: *Problème environnement, scénarios énergétiques et climatiques.*
Dans *Les Journées EEA*, 2007.
- [Hao06] N. Haoues: *Contribution à l'intégration des contraintes de désassemblage et de recyclage dès les premières phases de conception de produits.*
Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2006.
- [HHR05] A. Helias, U. De Haes et M. Rooijen: *Life Cycle Approaches.*
rapport technique, UNEP-SETAC Life Cycle Initiative, 2005.
- [HKLM04] T. Hartikainen, A. Korpela, J. Lehtonen et Risto Mikkonen: *A Comparative Life-Cycle Assessment Between NbTi and Copper Magnets.*
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 14 :1882–1885, 2004.
- [HP05] A. Hugo et E.N. Pistikopoulos: *Environmentally conscious long-range planning and design of supply chain networks.*
Journal of Cleaner Production, 13 :1471–1491, 2005.
- [ICM] *Site internet de l'International Council on Mining & Metals.*
<http://www.icmm.com/>, visité le 1^{er} septembre 2009.
- [IPP] *Site internet de synthèse sur la politique de produit intégrée.*
http://www.cfsd.org.uk/ipp-epd/ipp-epd_background.html, visité le 1^{er} septembre 2009.
- [ISO] *Site internet de l'Organisation Internationale de Normalisation.*
<http://www.iso.org/iso/home.htm>, visité le 1^{er} septembre 2009.
- [ISO96] *ISO 14001. Environmental Management Systems.*
International Organization for Standardization, 1996.
- [ISO97] *ISO 14040. Life Cycle Assessment - Principles and Framework.*
International Organization for Standardization, 1997.

- [ISO02a] *ISO 14048. Life Cycle Assessment - Data Documentation Format.* International Organization for Standardization, 2002.
- [ISO02b] *ISO 14062. Integrating Environmental aspects into product design.* International Organization for Standardization, 2002.
- [Jac93] A. Jacquard: *Voici le temps du monde fini.* Seuil, 1993.
- [Jan00] M. Janin: *Démarches d'éco-conception en entreprise. Un enjeu : construire la cohérence entre outils et processus.* Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2000.
- [JBC07] *JBC Liste des roulements.* Heizmann, 2007.
- [JEC⁺02] A.A. Jensen, J. Elkington, K. Christiansen, L. Hoffmann, B.T. Mollet, A. Schimdt et F. Van Dijk: *Life Cycle Assessment, LCA - A guide to approaches, experiences and information sources.* rapport technique, European Environment Agency, 2002.
- [JMC⁺03] O. Jolliet, M. Margni, R. Charles, S. Humbert, J. Payet, G. Rebitzer et R. Rosenbaum: *IMPACT 2002+ : life cycle impact assessment methodology.* The International International Journal of Life Cycle Assessment, 2003.
- [JSC05] O. Jolliet, M. Saade et P. Crettaz: *ACV, comprendre et réaliser un écobilan.* Presses Polytechniques Universitaires Romandes, Eyrolles, 2005.
- [Kha98] K. Khalifa: *Analyse du cycle de vie : Méthodes d'évaluation des impacts.* Dans *Les Techniques de l'Ingénieur*, G5615. Editions Tissot, 1998.
- [KM96] I. Kioskeridis et N. Margaris: *Loss minimization in Scalar-controlled induction motor drives with search controllers.* IEEE Transactions on Power Electronics, 11 :213–220, 1996.
- [KNM93] A.D. Kone, B. Nogarede et M. Lajoie Mazenc: *Le dimensionnement des actionneurs électriques : un problème de programmation non linéaire.* Journal of Physics, 3 :285–301, 1993.
- [KTOH04] R. Kannan, C.P. Tso, R. Osman et H.K. Ho: *LCA-LCCA of oil fired steam turbine power plant in Singapore.* Energy Conversion and Management, 45 :3093–3107, 2004.
- [LCF09] E. Laruelle, O. Chuniaud et A. Ficheux: *Déploiement de la démarche d'éco-conception dans un département R&D d'AREVA T&D.* Revue EE, SEE, 5 :25–31, 2009.
- [LCI] *Site internet de l'Initiative sur le Cycle de Vie.* <http://lcinitiative.unep.fr/>, visité le 1^{er} septembre 2009.
- [Liw67] M. Liwshitz: *Calcul des Machines Electriques, tome 1.* Dunod, 1967.
- [LMM07] D. Ladas, D. Milan et V. Mazauric: *Eco-conception des dispositifs électromécaniques.*

- Dans *Electrotechnique du Futur*, 2007.
- [LS98] *3-phase TEFV cage induction motors 0,09 to 160 kW*.
Leroy Sommer Technical Catalogue, 1998.
- [MAD⁺08] B. Multon, H. Ben Ahmed, V. Debusschere, J. Seigneurbieux, M. Ruellan et Y. Thiaux: *Eco-conception : de nouveaux critères de conception en électrotechnique pour le développement durable*.
Revue EE, SEE, pages 89–98, 2008.
- [Mar06] K.J. Martchek: *Modelling More Sustainable Aluminium*.
International Journal of Life Cycle Assessment, 11 :34–37, 2006.
- [Mat02] F. Mathieux: *Contribution à l'intégration de la valorisation en fin de vie dès la conception d'un produit. Une méthode basée sur l'évaluation multicritères de la recyclabilité du produit et sur l'identification de ses points faibles de conception*.
Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2002.
- [Meg89] G. Megie: *Ozone, l'équilibre rompu*.
Presses du CNRS, 1989.
- [Mih01] S. Mihai: *Les effets de la mondialisation sur les politiques nationales de l'énergie en Europe de l'est*.
Mondialisation et Energie - Liaisons Energie Francophonie, 2001.
- [MMRB73] D.H Meadows, D.L Meadows, J. Randers et W. Behrens: *Halte à la croissance ? Rapport sur les limites de la croissance*.
rapport technique, Massachusetts institute of technology, 1973.
- [MMS] *Site internet du Mining, Minerals and Sustainable Development*.
<http://www.iisd.org/mmsd/>, visité le 1^{er} septembre 2009.
- [Moh09] P. Mohr: *Analyse économique globale. Indices des prix des produits de base*.
rapport technique, Groupe Banque Scotia, 2009.
- [MS93] G.C. Montanari et L. Simoni: *Aging phenomenology and modeling*.
IEEE Transactions on Electrical Insulation, 28(5) :755–776, 1993.
- [Nis95] U. Nissen: *A methodology for the development of cleaner products*.
Journal of Cleaner Production, 3 :83–87, 1995.
- [Nor04] T.E. Norgate: *Metal Recycling : An Assessment Using Life Cycle Energy Consumption as a Sustainability Indicator*.
rapport technique, CSIRO Minerals, 2004.
- [NW02] P.H. Nielsen et H. Wenzel: *Integration of environmental aspects in product development : a stepwise procedure based on quantitative LCA*.
Journal of Cleaner Production, 10 :247–257, 2002.
- [PEC05] *Cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits consommateurs d'énergie*.
Directive 2005-32-CE du Parlement Européen et du Conseil, 2005.

- [Peh06] Martin Pehnt: *Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies*.
Renewable Energy, 31 :55–71, 2006.
- [Per96] C. Pertusa: *Contribution à la définition de moteurs à aimants permanents pour un véhicule électrique hybride routier*.
Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1996.
- [PMC06] *Guide technique. Les solutions pour optimiser vos systèmes motorisés*.
Programme Européen Motor Challenge, 2006.
- [PNU] *Site internet du Programme des Nations Unies pour l'Environnement*.
<http://www.unep.org>, visité le 1^{er} septembre 2009.
- [Pou98] M. Pouloujadoff: *Machines asynchrones, régime permanent*.
Dans *Les Techniques de l'Ingénieur*, D3480. Editions Tissot, 1998.
- [Reg03] J. Regnier: *Conception de systèmes hétérogènes du Génie Electrique par optimisation évolutionnaire multi-critère*.
Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2003.
- [RK02] C.J. Rydh et M. Karlstrom: *Life cycle inventory of recycling portable nickel-cadmium batteries*.
Resources, Conservation and Recycling, 34 :289–309, 2002.
- [Roq88] P. Roqueplo: *Pluies acides, menaces pour l'Europe*.
Economica, 1988.
- [Rou98] P. Rousseaux: *Analyse du cycle de vie, ACV*.
Dans *Les Techniques de l'Ingénieur*, G5500. Editions Tissot, 1998.
- [Roy83] D. Roye: *Modélisation thermique des machines électriques tournantes. Application à la machine à induction*.
Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1983.
- [RRM99] A. Rafaschieri, M. Rapaccini et G. Manfrida: *Life Cycle Assessment of electricity production from poplar energy crops compared with conventional fossil fuels*.
Energy Conversion and Management, 40 :1477–1493, 1999.
- [RS05] C.J. Rydh et B.A. Sanden: *Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part II : Energy return factors and overall battery efficiencies*.
Energy Conversion and Management, 46 :1980–2000, 2005.
- [Rug00] R. Rugliano: *Bilan Energétique Total*.
Dans *Les Techniques de l'Ingénieur*, A3835. Editions Tissot, 2000.
- [Ryd01] C.J. Rydh: *Environmental Assessment of Battery Systems in Life Cycle Management*.
rapport technique, Chalmers University of Technology, 2001.
- [Sal99] J. Salamitou: *Management environnemental : la norme ISO 14001*.
Dans *Les Techniques de l'Ingénieur*, G4600. Editions Tissot, 1999.

- [SCH06] *Energy Efficiency and Eco-design : major issues for Schneider Electric.* Scheider Electric, 2006.
- [Sco] *Site internet regroupant les évolution mondiales actualisées du cours des matières premières principales, de ScotiaBanque.*
<http://www.scotiabank.com/>, visité le 1^{er} septembre 2009.
- [SEE08] *Selecting Energy Efficient Distribution Transformers. A guide for Achieving Least-Cost Solutions.*
Strategies for development and diffusion of Energy Efficient Distribution Transformers, 2008.
- [SER] *Site internet de l'institut suédois de recherche sur l'environnement.*
<http://www.ivl.se/en>, visité le 1^{er} septembre 2009.
- [SET] *Site internet de la Société de Toxicologie et Chimie Environnementales.*
<http://www.setac.org/node/32>, visité le 1^{er} septembre 2009.
- [SL92] G.R. Slemon et X. Liu: *Modeling and design optimization of permanent magnet motors.*
Electric Machines and Power Systems, 20 :71–92, 1992.
- [SOM] *Site internet de la Société SOMFY.*
<http://www.somfy.fr/>, visité le 1^{er} septembre 2009.
- [SS63] S.A. Swan et J.W. Salmon: *Effective resistance and reactance of a rectangular conductor placed in a semi-closed slot.*
Proc. I.E.E, 110 :1656–1662, 1963.
- [TBB06] T.V. Tran, S. Brisset et P. Brochet: *Apport de l'opt. multi-objectif en éco-conception de syst. électrotechniques, ex. d'un transformateur de sécurité.*
Dans *IREED*, 2006.
- [TK04] H.A. Toliyat et G.B. Kliman: *Handbook of Electrical Motors.*
CRC Press, 2004.
- [TK05] R.B.H. Tan et H.H. Khoo: *An LCA study of a primary aluminum supply chain.*
Journal of Cleaner Production, 13 :607–618, 2005.
- [Tou69] G. Toutlemonde: *Notions de mécanique statique et de résistance des matériaux.*
Technip, 1969.
- [Tra09] T.V. Tran: *Problèmes Combinatoires et Modèles Multi-Niveaux pour la Conception Optimale des Machines Electriques.*
Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2009.
- [Tri04] J.F. Trigeol: *Identification des pertes d'une machine électrique par une approche thermique et à l'aide d'une technique inverse.*
Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2004.
- [TS08] S. Takeuchi et K. Saitou: *Design for product emmbedded disassembly, ch2.*
Springer Berlin Heidelberg, 2008.

- [TSK06] J. Tingstrom, L. Swanstrom et R. Karlsson: *Sustainability management in product development projects the ABB experience*.
Journal of Cleaner Production, 14 :1377–1385, 2006.
- [TSO99] U. Takayoshi, T. Shiino et H. Onishi: *Evaluation of electronic components in life cycle assessment*.
Journal of Mater Cycles Waste Management, 1 :25–32, 1999.
- [Van06] J.C. Vannier: *Conception de moteurs électriques des accessoires sur l'automobile pour en améliorer la recyclabilité*.
Dans *SEE : Eco-conception et méthodologies de conception, quelques exemples de pratiques en Génie Electrique*, 2006.
- [vB07a] R. van Berkel: *Eco-efficiency in primary metals production : Context, perspectives and methods*.
Resources, Conservation and Recycling, 51 :511–540, 2007.
- [vB07b] R. van Berkel: *Eco-efficiency in the Australian minerals processing sector*.
Journal of Cleaner Production, 15 :772–781, 2007.
- [Ven97] J.P. Ventere: *Conception écologique des produits*.
Dans *Les Techniques de l'Ingénieur*, G6000. Editions Tissot, 1997.
- [VP01] J. Vigneron et J.F. Patingre: *Eco-conception. Concept, Méthodes, Outils, Guide et Perspectives*.
Economica, 2001.
- [Vra68] J.E. Vrancik: *Prediction of Windage Power Loss in Alternators*.
Rapport technique TN D-4849, NASA, 1968.
- [VV09] P. Vidal et J.C. Vannier: *Conception de moteurs électriques pour améliorer le recyclage des automobiles*.
Dans *Revue 3EI*, tome 57, pages 74–78, 2009.
- [WMC⁺09] W. Wang, T. Mehiri, R. Critchley, F. Gallon et G. Tremouille: *Problematic and possible solutions to improve energy efficiency and decrease CO₂-equivalent emissions in the transmission of electricity*.
Revue EE, SEE, 5 :46–51, 2009.
- [WRI] *Site internet du World Resource Institute*.
<http://www.wri.org/>, visité le 1^{er} septembre 2009.
- [WSE06] S.S. Williamson, S.M. Srdjan et A. Emadi: *Comprehensive drive train efficiency analysis of hybrid electric and fuel cell vehicles based on motor-controller efficiency modeling*.
IEEE Transaction on Power Electronics, 2006.
- [WW96] B.P. Weidema et M.S. Wesnaes: *Data quality management for life cycle inventories : an example of using data quality indicators*.
The Journal of Cleaner Production, 1996.
- [YJK02] M.K. Yoon, C.S. Jeon et S. Ken Kauh: *Efficiency increase of an induction motor by improving cooling performance*.
IEEE Transactions on Power Electronics, 17 :1–6, 2002.