

Université d'Artois – Ecole Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur ED 072
Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement

THÈSE

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE D'ARTOIS

Discipline : Génie Electrique

**ECO-CONCEPTION DES MOTORISATIONS
ELECTRIQUES : APPLICATION A LA MACHINE
ASYNCHRONE**

Soutenue publiquement à Béthune le 30 novembre 2012

par

Walid BOUGHANMI

Devant le jury composé de :

Rapporteurs :

B. MULTON	Professeur, SATIE – ENS Cachan
D. MALEC	Professeur, LAPLACE – Université Paul Sabatier

Examineurs :

D. ROGER	Professeur, LSEE – Université d'Artois, Directeur de thèse
J.P. MANATA	MCF, LSEE – Université d'Artois, Co-encadreur de thèse
F. STREIFF	Ingénieur R&D, Département SEET – ADEME à Angers, Invité
T. JACQ	Ingénieur R&D, Département THEMIS – EDF R&D à Clamart, Invité

Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement (LSEE)
FSA, Technoparc Futura, F-62400 Béthune

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur le Professeur **Jean-François BRUDNY**, Directeur du Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement (LSEE), pour m'avoir accueilli au sein de son équipe. J'ai notamment apprécié toutes les discussions scientifiques ou autres que nous avons pu partager.

Ensuite j'adresse mes remerciements à Monsieur le Professeur **Daniel ROGER**, directeur adjoint du LSEE, pour m'avoir encadré et guidé tout au long de mes travaux. J'ai apprécié les qualités humaines et pédagogiques dont il a fait preuve en partageant son expérience et son savoir. J'exprime également mes remerciements à Monsieur **Jean-Paul MANATA**, Maître de Conférences à l'Université d'Artois, pour m'avoir co-encadré, pour son aide tout au long de mes travaux et pour ses précieux conseils et suggestions. Messieurs, je vous témoigne ma profonde gratitude pour votre contribution, votre soutien et votre disponibilité permanente lors de l'encadrement de ce travail ainsi que pour les relations amicales que vous avez su créer et entretenir entre nous.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des membres du jury pour leur collaboration à l'examen de ce travail et leur participation à la soutenance ;

Je remercie profondément Monsieur **Bernard MULTON**, Professeur à l'*Ecole Normale Supérieure*, ainsi que Monsieur **David MALEC**, Professeur à l'Université *Paul Sabatier*, pour l'intérêt qu'ils ont accordé à mes travaux de recherche en acceptant d'en être rapporteurs. Leurs commentaires ont enrichi ce travail.

Je remercie Monsieur **Frédéric STREIFF**, Ingénieur – ADEME à Angers et Monsieur **Thierry JACQ**, Ingénieur – EDF R&D à Clamart, pour leur suivi des travaux de cette thèse et leur participation au jury. Enfin, je remercie Monsieur **Maurice KRATZ** pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux en y apportant le point de vue de l'industriel.

Ma gratitude va également à la région Nord-Pas de Calais, au Fond Européen de Développement Régional (FEDER), à l'ADEME et à l'EDF R&D qui ont soutenu, dans le cadre du projet MEDEE, financièrement ce travail. Je n'oublie pas les partenaires industriels et universitaires qui ont participé à ce programme.

Je pense aussi aux enseignants de la FSA et de l'IUT, ainsi qu'à l'ensemble des doctorants, du personnel technique et administratif. Un clin d'œil tout particulier aux thésards que j'ai vu devenir Docteurs, et avec qui j'ai partagé mon bureau dans une ambiance chaleureuse.

Enfin, je remercie ma famille et mes amis pour leur soutien moral durant ces années de thèse.

Table des matières

Table des matières	5
Glossaire	7
Introduction générale.....	11
1. Considérations sur l'éco-conception et l'analyse du cycle de vie	17
1.1. Contexte et problématique.....	17
1.2. Eco-conception.....	18
1.3. Analyse du cycle de vie (ACV)	22
1.4. Point sur l'étude bibliographique	28
1.5. Conclusion.....	33
2. Ecobilan global d'une machine asynchrone	37
2.1. Introduction	37
2.2. Mise en place à l'éco-conception	37
2.3. Modélisation de la machine asynchrone : application à la machine de référence	42
2.4. Méthode d'évaluation des impacts environnementaux	63
2.5. Résultats : Ecobilans énergétiques globaux.....	67
2.6. Conclusion.....	81
3. Pistes d'amélioration de l'écobilan d'une machine standard.....	85
3.1. Introduction	85
3.2. Système d'isolation électrique sans solvant	85
3.3. Structure d'un circuit magnétique plus éco-efficace	98
3.4. Composants en plastique issus de bio-polymères	107
3.5. Roulements éco-énergétiques	110
3.6. Conclusion.....	112
4. Prototype d'un moteur électrique à faible impact environnemental	115
4.1. Introduction	115
4.2. Réalisation d'un moteur prototype à faible impact	115
4.3. Essai comparatif à vide.....	119
4.4. Détermination du rendement d'après la norme CEI.....	122
4.5. Ecobilan global du prototype	131
4.6. Conclusion.....	133

Conclusion générale.....	137
Annexe A.....	143
1. Processus de fabrication industriel.....	143
Annexe B.....	147
1. Relations analytiques nécessaires à la conception.....	147
2. Données relatives à la machine de référence.....	152
3. Calcul des masses inactives de la machine.....	153
4. Calcul des paramètres électriques de la machine.....	155
5. Simulation de la machine par Flux2D.....	159
Annexe C.....	163
1. Photos des différentes expérimentations.....	163
Bibliographie.....	169

Glossaire

Abréviations

ACV	Analyse du cycle de vie
ADEME	Agence de l'environnement et maîtrise de l'énergie
EUP	Energy Using Product
IPP	Integrated Product Policy
RoHS	Restriction of Hazardous Substances
WEEE	Waste of Electrical and Electronic Equipment

Symboles

A_l	densité linéique du courant (A/m)	e_{cr}	épaisseur de la culasse rotorique (m)
b_a	largeur d'anneau de court circuit au rotor (m)	e_{cs}	épaisseur de la culasse statorique (m)
B_{cr}	induction dans la culasse rotorique (T)	e_{tm}	épaisseur de la tôle magnétique (m)
B_{cs}	induction dans la culasse statorique (T)	F	facteur de marche (%)
B_{dr}	induction dans les dents rotoriques (T)	f	coefficient de frottement aérodynamique (N.m/(rds ⁻¹) ²)
B_{ds}	induction dans les dents statoriques (T)	f_g	coefficient de frottement visqueux (N.m/rd.s ⁻¹)
B_{er}	largeur d'encoche rotorique (m)	f_s	fréquence statorique (Hz)
b_{er}	larguer moyenne d'encoche rotorique (m)	g	glissement de la machine
B_{es}	largeur d'encoche statorique (m)	h_e	hauteur d'entrefer (m)
b_{es}	largeur moyenne d'encoche statorique (m)	h_{er}	hauteur d'encoche rotorique (m)
B_δ	induction d'entrefer (T)	h_{es}	hauteur d'encoche statorique (m)
c	nombre de démarrages équivalent par heure	I_n	courant nominal du moteur (A)
c_0	couple de frottement sec (N.m)	J	moment d'inertie totale (Kg.m ²)
C_{CF}	pertes par courant de Foucault (W.kg ⁻¹ .s ⁻² .T ⁻²)	J_0	inertie de la machine de référence (kg.m ²)
C_e	couple électromagnétique (N.m)	K	coefficient de transformation stator/ rotor
C_{exc}	coefficient de pertes par excès (W.kg ⁻¹ .s ^{-3/2} .T ^{3/2})	k_b	coefficient de bobinage
C_{hyst}	pertes par hystérésis statique (W.kg ⁻¹ .s.T ²)	k_{br}	coefficient du bobinage au rotor
c_p	couple de pertes mécaniques (N.m)	k_c	coefficient de carter
d_{er}	diamètre extérieure rotorique (m)	Kd	coefficient de dispersion différentielle
d_{es}	diamètre extérieure statorique (m)	k_{sep}	coefficient de l'effet de peau de résistances
d_{fr}	diamètre de fond d'encoche rotorique (m)	k_{er}	facteur de forme de l'encoche rotorique
d_{fs}	diamètre de fond d'encoche statorique (m)	k_{es}	facteur de forme de l'encoche statorique
d_{ir}	diamètre intérieure rotorique (m)	k_i	coefficient d'inclinaison des barres rotoriques
d_{is}	diamètre intérieure statorique (m)	k_{ir}	valeur de l'inclinaison de barres du rotor
		k_{lco}	facteur de correction tenant compte de la géométrie
		k_{rr}	coefficient de remplissage d'encoche rotorique
		k_{rs}	coefficient de remplissage d'encoche statorique
		k_s	coefficient de saturation
		k_{sr}	rapport entre l'hauteur d'encoche statorique et rotorique
		k_{stm}	coefficient de foisonnement de tôles magnétiques
		k_{su}	coefficient de chute de tension au stator
		k_{sx}	coefficient de l'effet de peau de réactances
		L_a	longueur active du circuit magnétique (m)
		l_b	longueur totale de fil conducteur statorique (m)
		l_s	longueur d'une spire (m)
		$L_{s/r}$	inductance cyclique statorique/ rotorique (H)
		m	nombre d'encoche par pôle et par phase
		$M_{s/r}$	inductance mutuelle entre stator-rotor (H)

n	<i>vitesse de la machine (tr/min)</i>	X'_{dr}	<i>réactance de fuites différentielle rotorique (Ω)</i>
n_b	<i>nombre de bobines en parallèle.</i>	X'_{dr}	<i>réactance de fuites différentielle rotorique (Ω)</i>
n_D	<i>nombre de démarrages dans l'heure</i>	X'_{er}	<i>réactance de fuites d'encoche rotorique (Ω)</i>
N_r	<i>nombre de spires rotorique équivalent par phase et par pôle</i>	X'_{er}	<i>réactance de fuites d'encoche rotorique (Ω)</i>
N_s	<i>nombre de spires en série par phase</i>	X'_i	<i>réactance de fuite due à l'inclinaison de barres (Ω)</i>
p_{CF}	<i>pertes par courant de Foucault (W/kg)</i>	X'_i	<i>réactance due à l'inclinaison (Ω)</i>
p_{exc}	<i>pertes par excès (W/kg)</i>	X'_r	<i>réactance de fuites rotorique ramenée au stator (Ω)</i>
p_{fer}	<i>pertes fer (W)</i>	X_μ	<i>réactance magnétisante (Ω)</i>
p_{hyst}	<i>pertes par hystérésis statique (W/kg)</i>	X_{ds}	<i>réactance de fuites différentielle statorique (Ω)</i>
p_{Jr}	<i>pertes Joule rotorique (W)</i>	X_{es}	<i>réactance de fuites d'encoche statorique (Ω)</i>
p_{Js}	<i>pertes Joule statorique (W)</i>	X_s	<i>réactance de fuites statorique (Ω)</i>
p_{LL}	<i>pertes supplémentaires en charge (W)</i>	X_{tb}	<i>réactance de fuites de tête de bobine (Ω)</i>
P_n	<i>puissance nominale du moteur (W)</i>	Z_{er}	<i>nombre d'encoches rotoriques</i>
P_s	<i>puissance apparente (VA)</i>	Z_{es}	<i>nombre d'encoches statoriques</i>
P_u	<i>puissance utile du moteur pendant le cycle d'utilisation hors démarrage (W)</i>	ε_p	<i>coefficient qui tient compte de l'effet de peau</i>
q_s	<i>nombre de phase statorique</i>	ε_r	<i>permittivité relative de polyamide aromatique</i>
R'_r	<i>résistance rotorique ramenée au stator (Ω)</i>	λ_{acc}	<i>coefficient de perméance de fuites d'anneau de court-circuit rotorique</i>
R_μ	<i>résistance modélisant les pertes fer (Ω)</i>	λ_{dr}	<i>coefficient de perméance différentielle rotorique</i>
r_i	<i>résistance de l'induit de la MCC (Ω)</i>	λ_{ds}	<i>coefficient de perméance différentielle statorique</i>
R_s	<i>résistance de la phase statorique (Ω)</i>	λ_{er}	<i>coefficient de perméance d'encoche rotorique</i>
S_{cr}	<i>surface totale de la culasse rotorique (m^2)</i>	λ_{es}	<i>coefficient de perméance d'encoche statorique</i>
S_{cs}	<i>surface totale de la culasse statorique (m^2)</i>	λ_{tb}	<i>coefficient de perméance de tête de bobine</i>
S_e	<i>ouverture de la bobine en encoches</i>	μ_0	<i>perméabilité de vide ($4\pi 10^{-7}$ H/m)</i>
S_{er}	<i>surface totale des encoches rotoriques (m^2)</i>	μ_r	<i>perméabilité relative de fer électrique NO</i>
S_{es}	<i>surface totale des encoches statoriques (m^2)</i>	τ_{dr}	<i>pas dentaire moyen rotorique (m)</i>
T_c	<i>temps d'un cycle de fonctionnement (s)</i>	τ_{ds}	<i>pas dentaire moyen statorique (m)</i>
t_d	<i>temps de démarrage du moteur (s)</i>	τ_p	<i>pas polaire statorique (m)</i>
X'_{acc}	<i>réactance d'anneau de court-circuit (Ω)</i>	Ω	<i>vitesse rotorique (rd/s)</i>
X'_{acc}	<i>réactance de fuites de l'anneau de court-circuit (Ω)</i>	ω_s	<i>pulsation statorique (rd/s)</i>

Introduction générale

Introduction générale

Contexte de l'étude

Les machines électriques sont très utilisées dans l'industrie pour mettre en mouvement des systèmes de productions très divers. Ils sont généralement très répandus dans tous les secteurs de l'économie y compris chez les particuliers. A titre d'exemple, on cite les applications domestiques (réfrigérateur, machine à laver,...), industrielles (pompage, ventilation, air comprimé,...), mais aussi le domaine des transports (voiture électrique,...) et la production d'énergie (éoliennes,...).

Un moteur électrique est bien souvent un élément indispensable dans un processus, ce qui explique le fait que le marché des motorisations électriques est assez important. Chaque année, environ 30 millions de moteurs électriques nouveaux, de puissance moyenne comprise entre 0,75 kW et 300 kW, sont vendus dans le monde ; le nombre total de ces moteurs actuellement en service dans l'industrie, les infrastructures et les grands bâtiments est voisin de 300 millions [1]. A titre indicatif, en France, 30 % de l'énergie utilisée dans l'industrie est électrique, et 70 % de cette énergie est destinée aux moteurs électriques. Cela représente au total environ 90 TWh/an dans l'industrie [2]. Étant donné les très grandes quantités mises en jeu, une amélioration, même faible, des performances énergétiques de chaque unité apporte des économies d'énergie importantes. Dans un monde où l'énergie est appelée à être durablement plus rare, donc plus chère, l'utilisation de moteurs à haut rendement devient importante [3].

Les principales limites dans la conception des machines électriques sont liées aux caractéristiques des matériaux disponibles : la qualité des tôles magnétique impose l'induction maximale; la nature des isolants définit la température maximale admissible au cœur des bobinages; la résistance mécanique des aciers utilisés limite certaines dimensions... Lors de la démarche de conception, des choix sont nécessaires ; ils répondent à des critères qui varient en fonction des objectifs assignés. Par exemple, lorsque la puissance massique est une priorité, la démarche de conception produit des moteurs électriques très compacts mais au prix d'un rendement médiocre [4]. Lorsque les machines sont construites dans le but d'obtenir un rendement maximal, les choix de dimensionnement conduisent à des machines moins compactes. Elles peuvent alors bénéficier du label "IE" apparu dans le programme "Motor challenge" qui permet de répartir les performances en trois catégories : IE1, IE2 et IE3 pour les moteurs de 750 W à 375 kW (1000, 1500 et 3000 tr/min) et très récemment une quatrième classe IE4. Cependant, la catégorie IE1 n'étant désormais plus autorisée en Europe, depuis juin 2011, les moteurs sont obligatoirement de type IE2 ou plus (norme NF EN 60034-30).

On s'aperçoit, toutefois que, les moteurs électriques sont des machines intrinsèquement très performantes qui tendent à le devenir encore plus compte tenu des nombreux travaux en ce domaine. Citons, à simple titre d'exemple, le procédé d'injection du cuivre dans le rotor à la place de la traditionnelle cage en aluminium qui permet de réduire les pertes Joule dans les machines asynchrones [5]. Cette solution n'est pas sans quelques inconvénients sur les performances des tôles magnétiques [6]. Bien d'autres efforts sont faits dans les laboratoires universitaires ou les bureaux R&D industriels pour accroître le rendement des moteurs électriques. Ces efforts risquent encore de s'intensifier afin de pouvoir faire gagner aux motorisations un label énergétique valorisant.

Cette recherche du meilleur rendement a un double objectif économique et environnemental, cependant ce dernier aspect n'est pas conditionné par les seules performances énergétiques et opérationnelles d'une machine. Un moteur est, en effet, un produit complexe dans lequel de nombreux paramètres interviennent ; dans la démarche de dimensionnement le rendement est important mais son amélioration ne doit pas être le seul objectif pour concevoir un moteur à faible impact environnemental. Les études environnementales développées par ailleurs sur d'autres produits manufacturés (souvent plus simples) s'intéressent de manière plus globale au cycle

de vie complet, depuis la naissance du produit jusqu'à sa mise au rebut. En ce qui concerne les moteurs, produits complexes ayant des usages variés, les démarches classiques n'intègrent pas encore ces règles d'éco-conception [7]. Dans le domaine des machines électriques seules quelques études récentes commencent à prendre en compte cette vue plus globale. On peut citer, à titre d'exemple, une étude concernant les convertisseurs électromagnétiques [8] qui a permis de mettre en évidence l'importance des conditions de charge et la durée de vie du transformateur et du moteur sur leur éco-efficacité énergétique globale qui, permet d'évaluer l'impact environnemental réel du produit considérée en termes d'énergie primaire totale consommée et de CO₂ émis.

L'enjeu scientifique de cette étude consiste, donc, à placer les règles de l'art appliquées en matière de conception des moteurs électriques dans le contexte plus large de l'éco-conception. Il s'agit de rendre les moteurs électriques plus sobres en termes d'empreinte environnementale globale. La mesure des impacts environnementaux nécessite de prendre en compte les cycles de fonctionnement de la machine imposés par le contexte applicatif, les consommations de ressources, énergétiques et autres, propres à sa fabrication, sa mise en place et son recyclage en fin de vie.

Pour produire un moteur électrique, il faut principalement de l'acier, du cuivre, de l'aluminium, des matériaux isolants, des matières plastiques et un outil industriel adapté à sa production en grande série. Lorsque le moteur est fabriqué, il faut le transporter sur son lieu d'utilisation et le mettre en œuvre. Toutes ces opérations ont des coûts environnementaux résultants. Au niveau de la phase de construction, des émissions d'autres polluants spécifiques doivent être prises en compte, notamment les solvants utilisés pour traiter les vernis d'isolation des fils de cuivre et d'imprégnation des bobinages. Ces pollutions représentent des rejets importants car le fil de cuivre émaillé utilisé pour bobiner les machines électriques est un produit complexe et difficile à réaliser. Il est également nécessaire de prendre en compte les pollutions liées à la peinture et à la fabrication des pièces en plastique.

Pendant leur vie active, les moteurs électriques fonctionnent rarement aux points nominaux pour lesquels ils ont été conçus car les ingénieurs, en charge des systèmes industriels, intègrent bien souvent des marges de sécurité. Dans de très nombreux cas, les charges mécaniques entraînées demandent des puissances qui varient et les régimes transitoires correspondant aux démarrages peuvent être fréquents. Tous ces éléments doivent être pris en compte dans l'écobilan énergétique global d'une machine directement alimentée au réseau. En fin de vie, les machines sont démantelées, cette opération a également un coût énergétique. Les métaux et les matières plastiques peuvent être recyclés alors que les vernis isolants sont détruits, ce qui occasionne d'autres émissions de polluants.

Des choix sont obligatoirement faits lors de la conception de la motorisation électrique des équipements. Bien souvent, ils ne prennent en compte que les données disponibles et le coût immédiat de l'investissement est souvent prépondérant par rapport à toutes les autres considérations. Une démarche plus globale, basée sur l'éco-conception est souhaitable tant du point de vue du coût financier à moyen terme que de la minimisation de l'impact écologique de l'équipement à plus long terme. Cette démarche n'est possible que si les différents moteurs électriques susceptibles d'être installés sont accompagnés d'une fiche définissant l'écobilan énergétique prévisionnel dans des conditions normalisées de fonctionnement. Comme la vie d'un moteur électrique se compte en dizaines d'années, il apparaît que certaines restructurations des outils industriels sont susceptibles d'écourter cette vie et donc de modifier l'écobilan global. Ce paramètre doit donc être intégré dans la démarche d'éco-conception.

Objectifs de l'étude

C'est dans le cadre d'un projet commun EDF R&D – ADEME – LSEE que s'inscrit cette étude sur l'éco-conception des moteurs électriques. Ce projet comporte deux objectifs principaux :

- En premier lieu, il s'agit de suivre une démarche d'éco-conception appliquée à un moteur asynchrone triphasé représentatif de ce qui est installé massivement chaque jour dans l'industrie, en prenant en compte toutes les phases du cycle de vie qui commence de l'extraction de minerai jusqu'à la fin de vie

du moteur. Un écobilan énergétique est déterminé pour une durée de vie estimée et pour une utilisation répertoriée dans les normes actuelles. Dans cette étude, on traite non seulement les aspects « ressources » mais aussi les déchets produits en quantifiant également les matériaux utilisés, recyclables ou non, et rejetés au cours de ce cycle. Ce premier objectif est effectué à l'aide des outils informatiques d'analyse de cycle de vie (ACV) et d'un ensemble de données génériques et spécifiques.

- En second lieu, l'objectif est de proposer des solutions innovantes pour fabriquer des moteurs électriques en utilisant des matériaux plus respectueux de l'environnement, mais aussi en augmentant leur efficacité énergétique (consommation électrique moindre à puissance mécanique délivrée donnée). Ces solutions utilisent du fil émaillé polymérisé par l'Ultra Violet (UV) et fabriqué sans solvant, avec une couche thermo-adhérente remplaçant l'imprégnation du moteur avec des vernis, des plastiques à base de polymères biosourcés ainsi que des tôles magnétiques de hautes performances... L'intérêt de ces modifications est validé par l'utilisation d'une démarche comparative d'ACV.

Cadre de l'étude

Ce projet est supporté par EDF R&D et l'ADEME et il s'inscrit notamment dans le cadre du contrat de partenariat ADEME – Région Nord-Pas-de-Calais « Lutte contre le changement climatique » Domaine 2 : Réseaux énergétiques et maîtrise de la demande d'énergie. Il a été mené dans le cadre du pôle phare technologique MEDEE (Maîtrise Energétique Des Entraînements Electriques) et avec l'étiquette opération 3.2 « éco-conception des motorisations électriques » du programme MEDEE 3 intitulé « éco-efficacité énergétique par le dimensionnement et le diagnostic ». Ce projet, proposé par EDF R&D, a bénéficié de financements de l'Europe (FEDER), de l'Etat et de la Région Nord Pas de Calais. Le financement du doctorant a été assuré par EDF R&D et l'ADEME. Ce projet est réalisé en collaboration étroite avec différents partenaires industriels :

- le coût énergétique supplémentaire initial induit par l'utilisation de tôles magnétiques à hautes performances est évalué en collaboration avec *ThyssenKrupp Electrical Steel UGO* qui possède une unité de production dans la région à proximité de l'université;
- les données relatives au coût écologique de production du fil émaillé « classique » et du fil sans solvant sont fournies par *ACEBSA* (Espagne) qui possède des unités de productions classiques et une unité expérimentale de production de fil avec un système d'isolation « sans solvant »;
- la société *Green Isolight International* (Labourse) a fourni les données et les échantillons nécessaires à la mise au point du procédé de thermocollage;
- les problèmes liés à la chimie des pièces en plastique sont traités par l'*Unité de Chimie et de Catalyse du Solide (UCCS)* qui est un laboratoire CNRS de l'université d'Artois et dont une antenne est implantée à Béthune.

Contenu et organisation du manuscrit

La structure de ce manuscrit de thèse comporte quatre chapitres principaux.

Le premier chapitre synthétise une étude de la littérature scientifique dans le but de recueillir les informations nécessaires sur la démarche d'éco-conception et son outil Analyse du Cycle de Vie (ACV) appliquée pour tous les produits, et particulièrement, les produits d'électronique et de systèmes électriques. Un point sur les travaux de recherche en éco-conception dans le domaine du génie électrique et, en particulier, les systèmes électrotechniques est présenté.

Le deuxième chapitre présente la démarche d'éco-conception appliquée à une machine triphasée standard. Dans un premier temps, les éléments nécessaires à l'éco-conception (inventaire de matières et d'énergie, profil de fonctionnement, etc.) sont détaillés. On s'est intéressé à la modélisation géométrique et électrique de la machine. Cela suppose de calculer les masses de chaque composant constituant la machine et les pertes énergétiques pour

un régime spécifique imposé par la charge mécanique. A ce stade du manuscrit, la méthode d'évaluation des impacts environnementaux et les outils utilisés sont également présentés. Dans un second temps, les résultats de la démarche d'éco-conception basée sur l'ACV de la machine standard sont exposés et interprétés selon différents scénarios de fonctionnement. Des exemples illustratifs d'éco-dimensionnement et d'éco-choix des moteurs standards en utilisant le catalogue du fabricant Leroy Somer montrent la contribution de l'outil ACV à la minimisation des impacts environnementaux des moteurs standards existants.

Le troisième chapitre propose diverses solutions innovantes qui peuvent être introduites sur les moteurs standards afin d'améliorer leur écobilan énergétique global. Les solutions envisagées utilisent une nouvelle structure magnétique à base de tôles à grains orientés à hautes performances et correctement assemblées. Les solutions proposées mettent en œuvre des fils émaillés nouveaux à faible impact environnemental fabriqués sans utiliser aucun solvant, un procédé de thermocollage des bobinages en remplacement des techniques actuelles d'imprégnation qui utilisent des vernis, des solvants et de l'énergie pour le séchage en étuve. Ces solutions incluent aussi le remplacement des plastiques classiques issus de la pétrochimie par des matériaux nouveaux issus de l'agriculture. Ces propositions sont testées et comparées, du point de vue technique et environnemental, à celles déjà existantes dans le moteur standard. Ces solutions ont été étudiées en collaboration avec divers partenaires industriels.

Le quatrième chapitre est consacré à la fabrication et au test d'un prototype de moteur électrique à plus faible impact environnemental qui retient les solutions proposées dans le chapitre précédent. Les divers processus de construction du prototype ont été élaborés et la démarche s'est achevée par la livraison du prototype de moteur à faible impact environnemental. Ensuite, une campagne d'essais a été réalisée sur le moteur prototype et le moteur de référence afin de comparer ses performances. Le rendement des machines est déterminé selon la norme IEC 60034- 2-1 à partir des essais. L'écobilan global du prototype et du moteur de référence est réalisé afin de mesurer l'intérêt environnemental global de notre étude prenant en compte toutes les phases du cycle de vie du moteur.

Chapitre 1 :
Considérations sur l'éco-conception
et l'analyse du cycle de vie

1. Considérations sur l'éco-conception et l'analyse du cycle de vie

Après l'analyse de la littérature scientifique, un état de l'art qui est présenté sur la démarche générale d'éco-conception et l'analyse sur cycle de vie, montre l'existence d'un ensemble de normes *ISO 14020, 21, 24, 25 (1998)* ; *ISO 14048 (2000)* ; *ISO 14062 (2002)* ; *ISO 14040, 44 (2006)*, et des directives européennes en vigueur (*EUP, WEEE, RoHS...*) et des rapports remis aux partenaires industriels (*Schneider Electric, ABB Oy, ADEME,...*). Cette revue de littérature a permis d'observer que peu d'analyses de cycle de vie ont été réalisées sur les produits du domaine du génie électrique, même si dans la littérature scientifique, certains travaux très récents sont menés sur l'aspect de l'intégration de l'environnement dans le processus de conception d'un produit.

Ce chapitre explicite les raisonnements communs qui conduisent à la démarche d'éco-conception d'un produit. Il se subdivise en trois grandes parties : la première présente le contexte et la problématique du travail, la seconde s'intéresse à la définition de l'éco-conception et l'outil Analyse du Cycle de Vie tandis que la troisième partie est consacrée aux travaux de recherche en éco-conception dans le domaine du génie électrique et, en particulier, des systèmes électrotechniques.

1.1. Contexte et problématique

La dégradation de l'environnement est considérée aujourd'hui comme une menace sérieuse qui pèse sur la société et particulièrement sur la santé humaine. Cette problématique est au centre du « développement durable », expression qui ne cesse d'être écrite, prononcée et revendiquée. Le Sommet de la Terre de Rio, en 1992, a abouti à la rédaction des 27 principes de la Déclaration de Rio, qui posent les bases des responsabilités de chaque pays dans le domaine de l'environnement et du développement durable [9]. Le premier principe indique que les êtres humains sont au centre des préoccupations relatives au développement durable. Ils ont droit à une vie saine et productive en harmonie avec la nature. Selon Madame Gro Harlem Brundtland, la santé est « *un bien-être physique, mental et social total, et pas simplement une absence de maladie ou d'infirmité* » [10].

Les pollutions locales comme les pluies acides [11], globales comme l'effet de serre, les trous dans la couche d'ozone [12], la raréfaction des ressources énergétiques amenant différentes crises, comme celles du pétrole [13], la forte augmentation du prix des matières premières [14], ont conduit, dans tous les secteurs d'activités, 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 des problèmes causés par les sociétés industrielles à la planète. Beaucoup de ces concepts reposent sur de réels travaux scientifiques, souvent autour du thème de l'éco-conception qui vise à placer les règles de l'art appliquées en matière de conception des produits dans le contexte plus général, intégrant le développement durable et la lutte contre les dégradations environnementales.

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est un outil utilisé par les industriels soucieux d'intégrer les contraintes liées au développement durable dans la conception de leurs produits conformément à la norme ISO 14062 [15]. Cet outil est défini par la norme ISO 14044 [16] comme étant une « *compilation et une évaluation des entrants, des sortants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie* ». Son utilisation est de plus en plus répandue pour la prise de décision lors de la conception et l'amélioration de produits en vue de les rendre plus performants du point de vue environnemental. En effet, l'évaluation des impacts environnementaux d'un produit

ne peut être réellement estimée, d'après les experts qu'à environ 80 % [17]. Il est judicieux d'utiliser une méthode d'évaluation environnementale dès les premières étapes de conception ou d'amélioration de produits.

Les informations nécessaires à la réalisation d'une ACV en conformité avec les normes ISO visant à comparer toutes les options d'améliorations possibles d'un produit s'avèrent habituellement très importantes et peu réalisables en pratique. Cette problématique est très importante pour des grandes entreprises, étant donné le grand nombre de produits pour lesquels un processus d'amélioration environnemental basé sur l'ACV pourrait être appliqué. En effet, l'étape de conception nécessite l'analyse d'un grand nombre d'options comme le choix des matériaux, de l'emballage ou des méthodes de fabrication. Déterminer les composants le plus impactant d'un produit à l'aide d'une ACV s'avère, donc, une pratique intéressante, puisqu'elle fournit à l'éco-concepteur l'information nécessaire pour développer de nouveaux produits ayant des impacts réduits sur l'environnement sous condition que les bases de données soient suffisamment approvisionnées en informations à jour.

1.2. Eco-conception

1.2.1. Définition et typologie d'éco-conception

La norme ISO 14062 définit l'éco-conception comme étant « *l'intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produits* ». Cette norme mentionne aussi différents synonymes tels que « *conception pour l'environnement* » ou « *partie environnementale de la gestion responsable des produits* », etc. Dans le cas de l'éco-conception d'un produit existant, certains auteurs utilisent le terme « *eco-redesign* ».

Il existe différentes visions de l'éco-conception, ce qui a été mis en lumière par Conny Bakker [18] et par Marc Janin [19]. Une première vision de l'éco-conception est basée sur « l'intégration des aspects environnementaux dans le processus de développement des produits ». Cette vision est basée sur l'amélioration technologique des produits pour les rendre de plus en plus efficaces du point de vue environnemental. La seconde vision de l'éco-conception est liée au concept de produits et de mode de vie des utilisateurs. Cette vision plus globale intègre des aspects sociaux et culturels. Contrairement à la première définition, elle peut remettre en question la raison d'être du produit si celui-ci est jugé inutile ou superflu, son intérêt est alors jugé trop faible par rapport à un coût environnemental.

L'expression abrégée "éco-conception" désigne la prise en compte de l'environnement dans la conception des produits qui peuvent être des biens matériels ou des services. Il s'agit d'introduire le paramètre environnemental au sein du jeu des paramètres classiques de conception (attente des clients, maîtrise des coûts, faisabilité technique, etc.), (cf. figure 1-1).

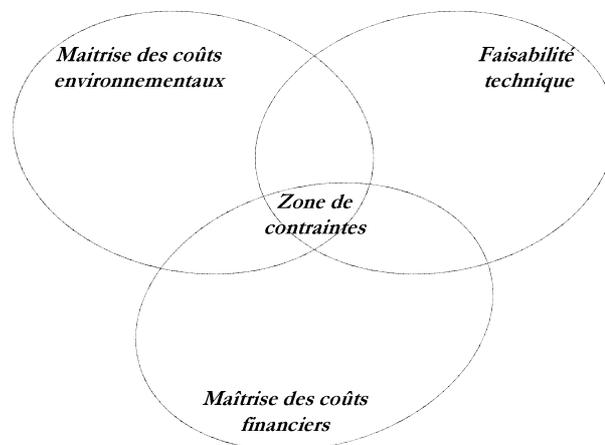


Figure 1-1. Intégration de l'aspect environnemental dans la démarche de conception classique

Cette démarche intéresse en premier lieu divers types d'acteurs économiques : fournisseurs, producteurs, distributeurs, consommateurs (acheteurs publics et privés), désireux de proposer ou de choisir, à service rendu égal, des produits plus respectueux de l'environnement. Parce qu'elle se situe en amont des décisions, l'éco-conception est une démarche préventive. Elle est une approche multicritère de l'environnement (eau, air, sol, bruit, déchets, énergie, matières premières, etc.) qui prend en compte l'ensemble des étapes du cycle de vie d'un produit : extraction des matières premières, production, distribution, utilisation, puis traitement en fin de vie. Cette double caractéristique de l'éco-conception (multicritère, multi-étape) constitue en quelque sorte sa signature. Selon leur degré de prise en compte des impacts environnementaux sur tout le cycle de vie, les méthodes d'investigation peuvent être qualifiées d'approfondies ou de simplifiées."

Brezet (1997) [20] et Stevels (1999) [21] ont défini l'existence de quatre niveaux d'éco-conception, tel que montré au Tableau 1-1. Selon leurs travaux, plus le niveau d'éco-conception augmente, plus le niveau d'éco-efficacité sera élevé. Cela se traduit par la conception de nouveaux produits ou services qui seront radicalement différents des produits originaux. Parallèlement, cela implique que, pour obtenir une remise en cause aussi complète des produits, les entreprises doivent se mobiliser et investir plus de temps et d'efforts. Plus le niveau d'éco-conception augmente, plus il est nécessaire d'étudier de manière approfondie les impacts environnementaux des produits que l'on cherche à reconcevoir.

Tableau 1-1. Niveaux d'éco-conception (Brezet, H., 1997; Stevels, 1999) [20]

Niveau 1	L'amélioration environnementale de produits existants ;
Niveau 2	La conception de produits radicalement différents, basée sur une technologie existante, mais améliorée ;
Niveau 3	Solutions alternatives pour une même fonction (« Green function innovation ») par l'application de différentes technologies pour de nouveaux produits ;
Niveau 4	Fonctionnalité compatible avec le développement durable (« Green Systems innovation ») c.-à-d. le remplacement de solutions existantes par des solutions totalement nouvelles ;

En se basant sur plusieurs exemples tirés de la littérature et de leurs recherches antérieures, Abrassart et Aggeri (2007) [22] ont identifié quatre situations différentes d'éco-conception selon les méthodes de gestion des entreprises et les enjeux associés. Leur premier critère pour classer les situations d'éco-conception porte sur le moyen utilisé pour évaluer l'impact environnemental global. L'approche d'évaluation est dite confinée lorsqu'elle peut être définie précisément (critères de conception, cahier des charges, normes et règlements) au début du processus de conception. Elle est dite exploratoire pour la situation où les critères ne peuvent être précisément définis au début du processus de conception, mais sont construits au cours de ce processus.

Leur deuxième critère est l'approche d'éco-conception employée, c'est-à-dire l'étendue de l'évaluation environnementale réalisée. Dans le cas où une seule dimension environnementale est considérée (un seul critère/catégorie d'indicateur environnemental tel que les émissions de gaz à effet de serre ou le taux de recyclabilité du produit), l'approche est dite sélective. Dans le cas où plusieurs dimensions environnementales sont prises en compte, l'approche d'éco-conception est dite systémique. Une démarche d'éco-conception intégrant l'analyse de cycle de vie est donc un exemple d'approche systémique, puisque plusieurs types d'impacts environnementaux y sont pris en compte.

1.2.2. Caractère multidisciplinaire de l'éco-conception

L'éco-conception est caractérisée par le fait qu'elle fait généralement intervenir différents acteurs d'une entreprise. Chacun de ces acteurs a des compétences différentes ainsi que des niveaux de connaissance très variables en ce qui concerne l'éco-conception et l'analyse de cycle de vie [19]. La figure 1-2 montre un exemple de différents acteurs et leurs relations principales, qu'ils soient externes ou internes à l'entreprise, et qui ont de l'influence sur ce processus. Parmi les acteurs privilégiés dans les équipes de conception, il y a des employés des

départements de recherche et développement, de marketing et des achats. Afin de réaliser une démarche d'éco-conception globale et précise d'un produit donné, chaque étape de conception doit être subdivisée en sous-étapes de plus en plus précises.

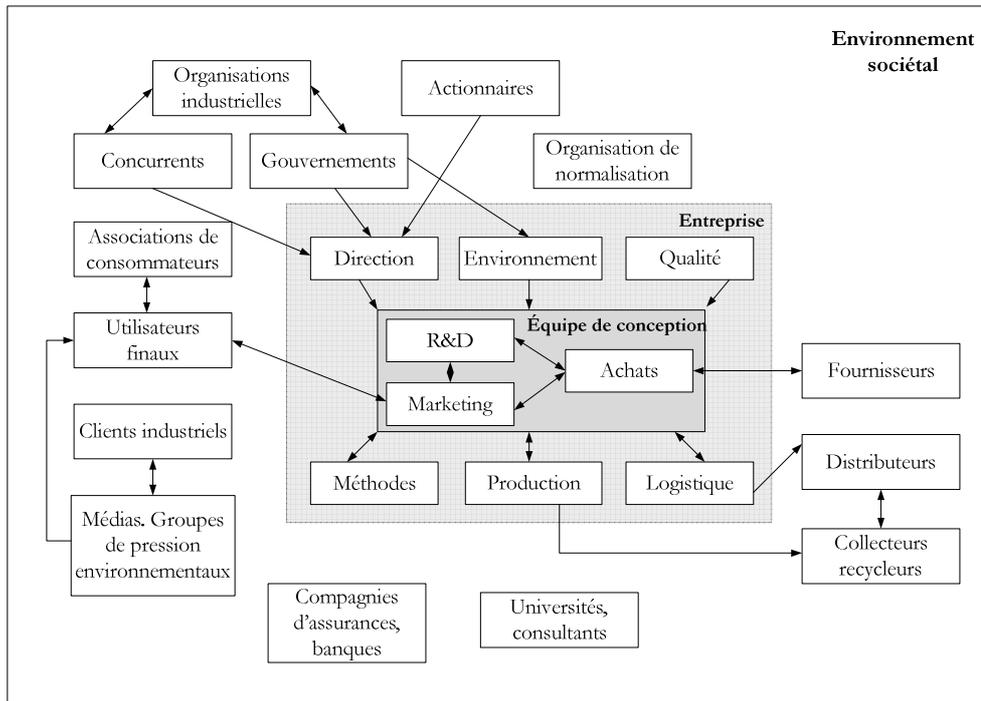


Figure 1-2. Acteurs internes et externes concernés par l'éco-conception et leurs liens d'influence [23]

L'un des paradoxes de l'éco-conception est le fait que, avec le temps, le concepteur a plus d'informations sur le produit. Il est plus facile pour lui de connaître ses caractéristiques environnementales. Cependant, plus le temps passe, moins l'éco-concepteur a de liberté par rapport aux choix de conception [24]. Ce paradoxe se répercute lors de l'analyse environnementale d'« éco-produits » ou d'options de conception, en particulier lors de l'emploi d'une méthode demandant des données quantitatives. La figure 1-3 illustre l'expression du paradoxe de l'éco-conception.

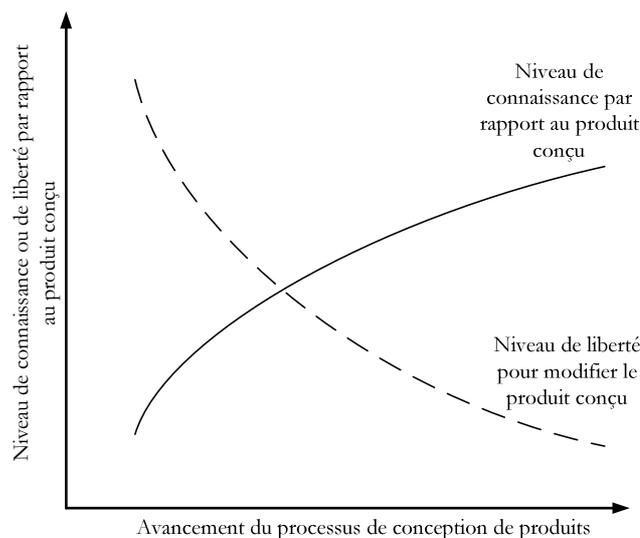


Figure 1-3. Expression du paradoxe de l'éco-conception [25]

1.2.3. Retombés économiques d'éco-conception

L'éco-conception est un sujet relativement nouveau ; la première norme internationale sur le sujet (ISO 14062) est parue en 2003. Il n'est donc pas étonnant que les expériences d'éco-conception soient relativement récentes. Selon une étude [26] portant sur des entreprises canadiennes et françaises, dans une grande majorité des cas, les répondants déclarent faire de l'éco-conception depuis dix ans au moins. En premier lieu, il est intéressant d'analyser les motivations des entreprises pour initier une démarche d'éco-conception. Dans la plupart des cas, ce sont les dirigeants des entreprises qui ont conduit les entreprises à intégrer la démarche d'éco-conception dans le développement de leurs produits [27]. Pour 70 % d'entre elles, l'éco-conception a contribué à accroître les profits de l'entreprise via une augmentation des ventes ou une réduction des coûts variables (baisse des consommations d'énergie et de matières premières). En raison des retombées économiques espérées par les industriels qui s'affichent éco-concepteurs, une certaine défiance peut être de mise sans soupçonner de "green washing" chaque groupe industriel ; force est de constater que les aspects marketing et économiques impliquent certainement un biais, notamment dans la publication ou non de résultats d'étude et sur la seconde vision de l'éco-conception liée au concept de produits et de monde de vie durables.

Pour une entreprise, l'éco-conception a également des retombées organisationnelles. Même si ces impacts d'ordre qualitatif ne se traduisent pas directement en chiffre d'affaires additionnel, ils ont une influence à plus long terme. La démarche d'éco-conception nécessite aussi l'acquisition et la gestion de nouvelles connaissances et compétences relative à l'impact environnemental du cycle de vie du produit. Le logique cycle de vie permet de « réfléchir autrement » et de ne pas seulement raisonner en termes de matières ou de technologies pour trouver de nouvelles solutions. Elle permet de donner un nouveau souffle à la R&D en lui ouvrant de nouveaux champs. La démarche permet alors de stimuler la créativité et l'innovation. La plupart des entreprises ont indiqué que le produit éco-conçu a eu un impact sur la créativité au sein de l'entreprise. L'innovation peut se traduire par des attributs fonctionnels supplémentaires sur le produit. En France, ce sont d'ailleurs souvent ces caractéristiques fonctionnelles qui sont mises en avant auprès du client plutôt que le bénéfice environnemental. L'intérêt de l'entreprise à s'engager dans ce type de démarche dépasse donc bien l'intérêt pour l'environnement.

1.2.4. Outils d'éco-conception

Diverses études bibliographiques ont déjà été effectuées afin d'identifier les outils d'éco-conception disponibles (Janin, 2000 [19]; Lagerstedt, 2003 [28]; Le Pochat, 2005 [29]; Walker, 2007 [30]). Or, malgré le grand nombre d'outils disponibles, leur utilisation demeure encore limitée. Selon Lagerstedt (2003) [28], la meilleure façon pour que les concepteurs de produits soient actifs en éco-design est de les laisser être libres et créatifs. En ce sens, ils ne désirent pas d'informations inutiles ou d'outils d'éco-conception complexes.

Certains outils peuvent être qualifiés comme étant à dominance qualitative, tels que les listes de matériaux et les listes de principes d'éco-conception. D'autres peuvent être décrits comme étant à dominance quantitative, comme les indicateurs environnementaux et l'ACV [24]. Ces outils peuvent également être classés selon deux axes : l'analyse environnementale et l'amélioration environnementale [29] (cf. figure 1-4).

Dans un contexte d'éco-conception de produits, l'ACV est actuellement considérée comme étant l'outil de référence afin d'évaluer les impacts potentiels d'un produit sur tout son cycle de vie [31]. En effet, l'ACV permet de quantifier les impacts d'un produit en utilisant des modèles décrivant les relations de cause à effets et basés sur les sciences naturelles selon un cadre méthodologique régi par la norme ISO. Cependant, l'ACV apporte peu d'aide comme outil d'amélioration environnementale, il est nécessaire d'utiliser l'expertise des différents acteurs de la chaîne de conception des produits qui appliquent les idées et les concepts nouveaux avec des outils d'analyse complémentaires qui prennent en compte l'impact environnemental.

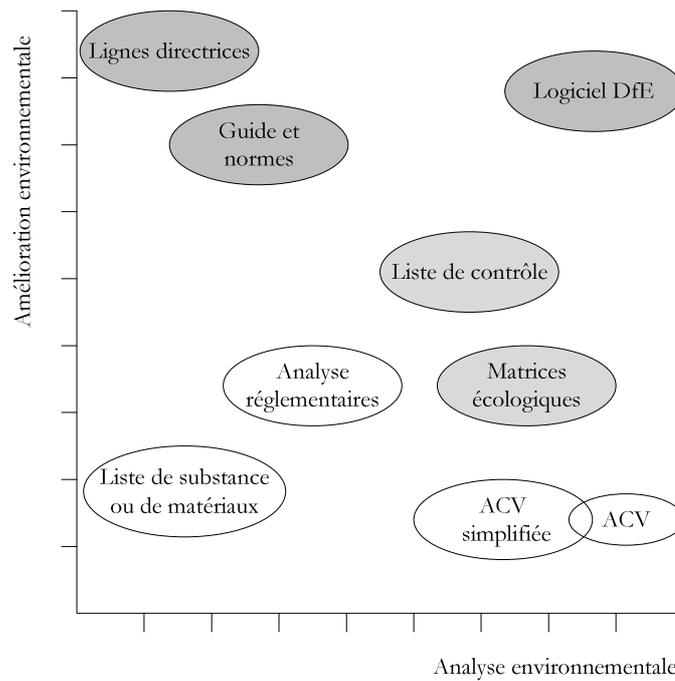


Figure 1-4. Classement des outils d'éco-conception (Le Pochat, 2005 [29])

1.3. Analyse du cycle de vie (ACV)

Cette section présente la définition et la méthodologie ACV, ses points forts et ses points faibles, son utilisation dans un contexte d'éco-conception.

1.3.1. Cadres historique et normatif

Durant les années 60, les premiers bilans énergétiques ont été réalisés. Une première étude pouvant s'apparenter à un « inventaire du cycle de vie » est réalisée par Coca-Cola (1969). Dans les années 80, les premières bases de données publiques d'ACV (BUWAL, Suisse) ont été mises en œuvre, jusqu'au développement des logiciels d'ACV et des bases de données « génériques » dans les années 90. C'est à cette époque que le « marketing vert » fait son apparition et des fabricants ont recours à l'ACV pour convaincre l'opinion. Des recherches de méthodes d'ACV simplifiées sont commencées dans les années 2000. Le 18 Juin 2003, la commission européenne environnementale a finalement adopté son rapport de la communication sur la politique intégrée des produits IPP (Integrated Product Policy) en optant pour une approche plus volontaire pour des produits plus écologiques, qui cherche à minimiser la dégradation environnementale causée par les produits tout au long de leur cycle de vie. Un historique plus détaillé est disposé dans la note de l'ADEME sur l'ACV [32].

La norme ISO 14040 (2006) - Management environnemental (ME) décrit les principes et le cadre d'Analyse du cycle de vie (ACV). La nouvelle norme ISO 14044 (2006) - ME - ACV - Exigences et lignes directrices - avec la version de 2006 de ISO 14040, annule et remplace l'ISO 14040 (1997), l'ISO 14041(1999), l'ISO 14042 (2000) et l'ISO 14043 (2000), qui ont été révisées. Il y a aussi la norme ISO 14048 (2000) - ME - ACV - Format de documentation de données et ISO 14049 (2000) - ME - ACV - Rapports techniques sur des exemples d'Analyse de l'Inventaire (AICV) selon ISO 14044. D'autres documents normatifs relatifs existent aussi telle que l'ISO 14020, 21, 24, 25 : Communication, Auto-déclaration, Eco-labels, Eco-profil et l'ISO 14062 : Eco-conception. Ces normes appartiennent à la série ISO 14000 relative au «Management environnemental approche produits ».

1.3.2. Définition de l'ACV

L'ACV est une évaluation environnementale du cycle de vie d'un objet ou d'un service. Elle est définie par la norme ISO 14040:2006 comme suit : « compilation et évaluation des entrants, des sortants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie » [33]. L'éco-conception a pour objectif de concevoir des produits et des services dont l'impact environnemental est moindre sur l'ensemble de leur cycle de vie. L'ACV est donc l'outil d'évaluation de la démarche d'éco-conception mise en œuvre sur un produit ou un service.

Le cycle de vie d'un produit s'entend "du berceau à la tombe", c'est-à-dire depuis l'extraction de la matière première jusqu'à la mise en décharge finale, en passant par toutes les phases de fabrication/montage, distribution, utilisation, valorisation de fin de vie (cf. figure 1-5) [33].

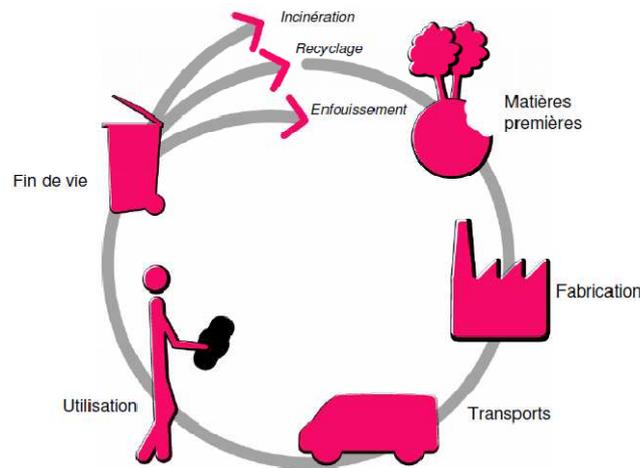


Figure 1-5. Cycle de vie et impacts environnementaux d'un produit [32]

Chaque phase du cycle de vie d'un produit a bien entendu un impact sur l'environnement, impact que l'on doit chercher à minimiser. C'est le but de l'éco-conception, qui doit alors considérer simultanément l'ensemble des différentes phases du cycle de vie du produit, en prenant garde à ce que l'amélioration du comportement environnemental d'une des phases ne se fasse pas au détriment de celui des autres phases. Une analyse complète et détaillée de ce cycle de vie (ACV) est utile afin de déterminer quels sont les points chauds d'un produit manufacturier et permettre ainsi de pouvoir effectuer un choix. Cela permet d'identifier les opportunités d'améliorations environnementales (Gasafi et al., 2003 [34]; Heijungs, 1996 [35]). Les cinq phases du cycle de vie d'un produit, schématisées par la figure 1-5, sont présentées et discutées ci-dessous ;

i. Le choix des matériaux

Par le choix des matériaux, le concepteur peut influencer l'impact de son produit sur l'environnement. Aussi, conformément aux règles générales d'éco-conception, ce choix devra prendre en compte un certain nombre de critères basés essentiellement sur la réduction de consommation de matière première et sur la diminution de l'impact environnemental des matériaux :

- La réduction de la masse et du volume de matière utilisée ; ce qui revient à optimiser le volume des pièces et à réduire leur nombre ;
- Le choix de matériaux pas ou peu toxiques, ce qui impacte la phase d'extraction, de production, d'utilisation, d'élimination (fin de vie) ;
- Le choix de matériaux produits à partir de ressources renouvelables afin de ne pas épuiser les ressources primaires non renouvelables ;

- Le choix de matériaux peu consommateurs d'énergie tant en phase d'extraction de la matière première, d'élaboration du matériau qu'en phase d'utilisation ;
- L'utilisation de matériaux recyclés ;
- L'utilisation de matériaux recyclables dans l'optique de la valorisation fin de vie des produits.

Bien entendu, tout en respectant au mieux ces critères environnementaux, les matériaux choisis devront répondre aux exigences fonctionnelles du produit du point de vue mécanique, électrique, coût, fabrication (moulage, découpe, etc.).

ii. La production

L'étape de production est une phase importante du cycle de vie à ne pas négliger lors d'une démarche d'éco-conception. En effet, les choix de conception peuvent avoir un impact important sur les processus industriels donc sur les impacts environnementaux liés à cette phase. Un certain nombre de critères d'optimisation de la production doivent donc être pris en compte dès la conception :

- La réduction des rejets vers l'environnement (eau, sol, air) par des choix de techniques de production minimisant les rejets vers l'environnement ;
- La minimisation de la consommation d'énergie à toutes les étapes de la production par des choix de techniques de fabrication, de montage, d'assemblage peu consommatrices d'énergie ;
- La réduction du volume de déchets (usinage, découpe, moulage, etc.) ;
- La réduction du nombre d'étapes de production ;
- La minimisation des transports entre les différentes étapes qui revient à minimiser le volume des transports inter usines (pièces, sous-ensembles) et donc à réduire la consommation d'énergie liée aux transports ;
- L'utilisation de nouvelles techniques de production dont l'impact environnemental est réduit par rapport aux techniques classiques.

iii. La distribution

La distribution des produits est, elle aussi, une phase du cycle de vie qui peut engendrer un impact environnemental important. C'est pourquoi la prise en compte notamment l'optimisation des emballages et du système de distribution lui-même, dès la conception du produit, est nécessaire.

A cet effet, et conformément aux normes (EN 13428 à 13432) et au décret paru au JO du 25/07/98, on se basera sur les critères suivants :

- La diminution de la masse et du volume des emballages par la réduction du volume et de la masse des produits et l'optimisation de la fonction emballage ;
- La réduction du nombre d'emballages différents en concevant des emballages communs à plusieurs produits ;
- Le choix d'emballages plus propres en réduisant la teneur en métaux lourds (plomb cadmium, mercure, etc.) ;
- La conception d'emballages réutilisables/valorisables, il est possible de valoriser de 50 à 65 % en poids et éviter les emballages hétérogènes (carton, mousse, etc.) ;
- L'optimisation/minimisation des transports par la réduction des masses et volumes à transporter ;
- Le choix des moyens de transports moins consommateurs d'énergie.

Comme toujours, le respect de ces différents critères ne devra pas se faire au détriment des fonctionnalités de base de l'emballage telles que protection et sécurité.

iv. L'utilisation

La phase d'utilisation des produits est une phase du cycle de vie dont l'impact environnemental peut s'avérer important, notamment du fait de leur consommation électrique. Là encore, la prise en compte d'un certain nombre de critères peut avoir un rôle déterminant :

- La minimisation de la consommation d'énergie en phase d'utilisation du produit par la réduction des pertes dans les machines électriques, les câbles d'alimentations, etc. ;
- La minimisation des fuites et rejets vers l'environnement en réduisant le bruit et les fuites (SF6 par exemple) ;
- L'accroissement de la longévité des produits s'ils sont placés dans des équipements où les conditions d'utilisation le permettent ;
- La maintenance et la réparation facilitées car l'amélioration de la fiabilité des produits, liaison client (pré-alarme, etc.), modularité des produits, etc.

Un autre point important en phase d'utilisation d'un produit est l'emploi de sources d'énergies propres et renouvelables.

v. La fin de vie

La valorisation en fin de vie d'un produit doit représenter une part importante du produit (70 à 80 % en poids) et est à la charge du producteur de ce produit. Aussi, afin d'espérer pouvoir respecter ces impératifs environnementaux à un coût minimum, il est nécessaire de concevoir le produit avec pour optique de faciliter cette phase. Pour cela, un certain nombre de critères devront, là encore, être pris en compte :

- La conception d'un produit final dont ces composants constituants sont, dans la mesure possible, facilement démontables en évitant les composants fluorés ;
- La réutilisation de sous-ensembles/composants donc de favoriser la modularité du produit ;
- La réparation/remise à neuf du produit (2ème main) ;
- Le recyclage des matériaux par le marquage des pièces plastiques (voir directive technique FT 20 050) et la réduction du nombre de matériaux différents ;
- Le choix de matériaux non toxiques lors de l'incinération ;
- Le démontage aisé des composants toxiques et/ou à traitement spécifique ce qui revient à permettre une accessibilité et un démontage rapide des piles, relais mercure, cartes électroniques, etc.
- La mise en sécurité aisée du produit (ressorts sous tension, etc.) ;
- La notice de fin de vie accompagnant le produit.

Le découpage en fonction de chacune des principales phases du cycle de vie du produit (choix des matériaux, production, distribution, utilisation, fin de vie) ne doit pas faire oublier que le but final est de minimiser l'impact global du produit tout au long de son cycle de vie. Il est essentiel que l'amélioration du comportement environnemental d'une des phases du cycle de vie ne se fasse pas au détriment de celui des autres phases.

1.3.3. Méthodologie de l'ACV

Le cadre méthodologique de l'ACV a été normalisé entre 1997 et 2000 par la série de normes ISO 14040 à 14043. Selon ces normes, cette méthodologie se construit en quatre étapes : objectifs, inventaire (bilan matière énergie), analyse des impacts et interprétation. Ces quatre points ne sont pas figés par un ordre chronologique invariant [36]. 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. Constater que certaines étapes du cycle de vie provoquent des impacts sur l'environnement prépondérants devant ceux occasionnés au cours des autres étapes. 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. Les interactions de quatre points d'ACV sont représentées à la figure 1-6.

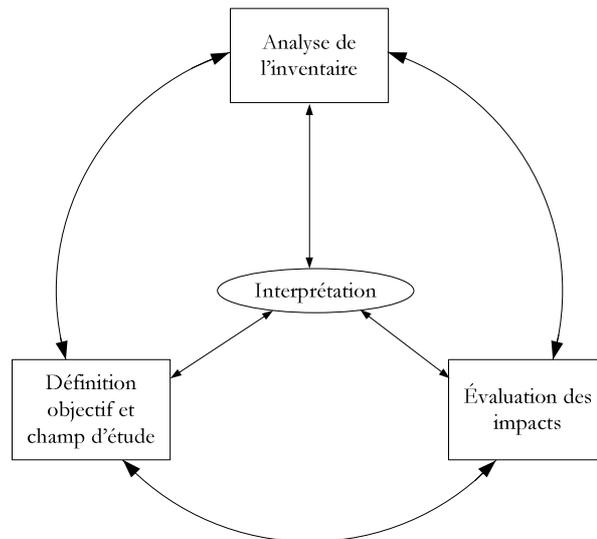


Figure 1-6. Points clés de l'analyse sur cycle de vie [37]

i. Objectifs

Les deux principaux objectifs de l'ACV sont l'évaluation comparative des étapes d'un cycle de vie afin d'identifier les transferts de pollution et l'évaluation comparative de plusieurs cycles de vie « concurrents » afin d'identifier les systèmes les plus respectueux de l'environnement. Les différents systèmes à comparer par une étude ACV doivent être initialement définis sur la base de leur type de fonctionnement. Cette base de comparaison, appelée « unité fonctionnelle », est fixée avec précision à partir de l'objectif de l'étude, de son utilisation et de la fonction étudiée. Dès lors que l'objectif a été fixé, les systèmes à étudier doivent être parfaitement explicités [38].

ii. Inventaire

Il s'agit d'identifier et de quantifier les flux de matière et d'énergie entrant et sortant des systèmes. L'existence d'erreurs est inhérente à l'élaboration de tels bilans. Il faut également souligner que le bilan matière énergie de différentes installations peut présenter des différences significatives. Afin d'éviter, dans certains cas, des généralisations abusives, il convient de bien décrire chaque système (nature du procédé, paramètres de fonctionnement...). On comptabilise ainsi les entrants (matières premières et énergie) et les sortants (produit, coproduit, rejets dans l'air et l'eau et déchets solides) pour tout ou partie du cycle de vie étudié [38-39]. La réalisation de ces bilans exige une recherche bibliographique importante et de nombreux contacts avec les industriels.

iii. Analyse des impacts

Cette phase consiste à traduire les flux de matière et d'énergie précédemment recensés en termes d'impacts potentiels sur l'environnement ; on peut regrouper ces impacts au sein de deux familles principales [40-41] :

- ✓ les impacts locaux (conséquences toxiques et écotoxiques, et nuisances telles que le bruit et les odeurs) ;
- ✓ les impacts globaux (effet de serre, dégradation de la couche d'ozone, épuisement des ressources naturelles).

La prise en compte de tous ces éléments permet de réaliser un bilan environnemental ; de comparer les bilans environnementaux. Il faut tenter de répondre à la question suivante : « au regard des impacts évalués, quel est le système globalement le plus respectueux de l'environnement ? » Ce problème devient vite complexe lorsqu'impacts et systèmes se multiplient.

iv. Interprétation

Il s'agit de réaliser une synthèse des bilans environnementaux et d'exploiter ces bilans pour répondre au mieux aux objectifs choisis. En terme de champs disciplinaires, la phase 1 relève d'une approche systémique classique ; la phase 2 concerne essentiellement le génie des procédés et des systèmes industriels ; la phase 3 fait appel, pour la caractérisation des impacts, aux disciplines de toxicologie, d'éco-toxicologie, à l'écologie et pour la comparaison des bilans environnementaux aux méthodes mathématiques d'analyse multicritère. La phase 4, quant à elle, relève de l'aide à la décision.

1.3.4. Applications d'ACV

L'ACV a souvent été appliquée pour étudier et labéliser des produits simples comme les emballages, les lessives ou les peintures et vernis. L'objectif de ces labels est de favoriser les produits qui, à valeur d'usage et qualité égales, ont un impact environnemental le plus faible à tous les stades de leur vie [36].

Un grand nombre d'ACV, pour la plupart européennes, ont déjà été réalisées. Elles portent sur une multitude de sujets. La liste est la suivante : vêtements, sacs d'épicerie, emballages et contenants, machines distributrices, produits comestibles, ordinateur personnel, couches, papier, bâtiments, voitures, bouteilles, produits pharmaceutiques, lieu d'enfouissement sanitaire, sites contaminés, moyens de transport, services de l'hôtellerie, portes et fenêtres, appareils électroménagers. Cette liste n'est pas exhaustive [42].

Les composants du Génie Electrique ont fait aussi l'objet d'analyses sur cycle de vie. Ces analyses sont régies par trois directives européennes (EUP 2005, RoHS 2003 et WEEE 2003), quatre séries de normes ISO de type organisme et trois séries de normes ISO de type produits [43]. Le management environnemental s'étend désormais aux composants électriques de la téléphonie mobile [44] aux batteries électrochimiques [45-46], aux métaux ferreux ou non [47-48], ainsi qu'à leurs chaînes de production [49] ou à des secteurs miniers complets [50]. Les systèmes de stockage [51-52], de production [53-55] et de conversion d'énergie [56] sont aussi étudiés. Enfin les fabricants du domaine de génie électrique [57] proposent également des écobilans plus ou moins détaillés de certains de leurs produits [58] tout comme les grands groupes de l'énergie [59-60]. En tant que premiers écobilans, ces analyses sur cycle de vie représentent les fondements des futures études d'éco-conceptions. En génie électrique comme dans tout autre domaine, l'éco-conception représente maintenant un axe de recherche vaste et émergent vu la complexité des systèmes électriques qui sont encore aujourd'hui majoritairement conçus sur la base d'un processus d'amélioration continue sans prendre en compte les impacts environnementaux générés. Une telle démarche d'éco-conception peut être aussi appliquée aux structures électromagnétiques classiques, transformateurs, machines électriques et convertisseurs de puissances, systèmes automobile, aéronautique et bâtiment, systèmes de transformation d'énergie, etc.

Il est important de noter que la norme ISO prévoit une revue critique pour toute ACV comparative divulguée au public. Cette revue critique consiste en une expertise de l'ACV par elle-même des personnes indépendantes.

i. Points forts de l'ACV

Les principaux points forts d'une ACV sont la notion de cycle de vie et l'évaluation quantitative des impacts. En premier lieu, la notion de cycle de vie permet d'identifier et de prendre en compte les transferts de pollution, ce qui n'est pas le cas des autres méthodes comme l'étude d'impact, le SME (Système de management environnemental), l'observatoire de l'environnement... Par exemple, une étape du cycle de vie d'une filière peut s'avérer très « propre » au niveau de ses frontières mais poser en amont et en aval des problèmes

d'environnement graves. L'importance de l'impact du transport des matières et de l'énergie dans une filière peut également être évaluée. L'ACV a pu montrer aussi que le recyclage n'est pas, dans tous les cas, synonyme de bénéfique pour l'environnement. Finalement, l'ACV, par la prise en compte de toutes les étapes du cycle de vie, est alors utile dans la recherche d'amélioration pour savoir où il faut agir. En revanche, la réponse à la question du « comment agir » est du ressort des compétences du spécialiste du système.

En deuxième lieu, La méthode ACV permet la quantification des impacts potentiels vis-à-vis de l'environnement à travers les indicateurs d'impact. Cette quantification constitue une donnée nouvelle intéressante dans la mesure où certains types d'impact vont être de plus en plus utilisés par les pouvoirs publics pour fixer des objectifs de qualité environnementale aux systèmes industriels. On peut citer, par exemple, la contribution à l'effet de serre.

ii. Points faibles

Les principaux points faibles sont la disponibilité et la qualité des données et les lacunes méthodologiques persistantes. Les données nécessaires ne sont pas habituellement mesurées par les exploitants et elles sont le plus souvent confidentielles ou difficilement accessibles. Il existe aussi des lacunes dans l'évaluation des impacts qui sont dues à la nécessité d'intégrer des paramètres spatio-temporels dans les bilans matière-énergie et à l'amélioration de la pertinence des indicateurs d'impact.

iii. Remèdes

Pour faire face aux problèmes de disponibilité des données, il faudrait utiliser de façon systématique un format de données standard. De plus, les données pourraient être gérées, regroupées et mises à disposition par des organismes tels que l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) ou l'IFEN (Institut Français de l'Environnement) pour la France. Les principales répercussions de cette mauvaise disponibilité des données sont le nombre important d'hypothèses, des simplifications parfois mal justifiées, des incertitudes dans les données et la mauvaise transportabilité des informations d'une étude à une autre. Assurer une bonne qualité des données d'inventaire du cycle de vie (ICV) et gérer les incertitudes sur les impacts environnementaux sont également un enjeu primordial pour la crédibilité de l'outil ACV [36].

Puisque l'analyse de cycle de vie détaillée est difficilement applicable, l'utilisation d'ACV simplifiées est une option intéressante qui a été étudiée par plusieurs auteurs (Côté, 2005 [61]; Janin, 2000 [19]; Lagerstedt, 2003 [28]; Le Pochat, 2005 [29]). Par rapport à l'analyse de cycle de vie détaillée, elles représentent un compromis entre rigueur scientifique et complexité (cf. figure 1-7). Le choix d'une méthode ACV simplifiée implique un équilibre entre la méthode de simplification et le type de résultats recherché par l'utilisateur.

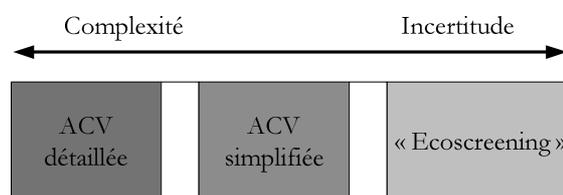


Figure 1-7. Analyse de cycle de vie simplifiée par rapport à la complexité et à l'incertitude d'une analyse de cycle de vie détaillée (adapté de Graedel, 1998 [17])

1.4. Point sur l'étude bibliographique

Cette section passe en revue les travaux concernant les démarches d'éco-conception des transformateurs ou des machines électriques. Le nombre de publications abordant cette problématique est encore faible.

Depuis les quelques années passées, les chercheurs de l'équipe de Satie – ENS Cachan, antenne de la Bretagne, ont mené des travaux de recherche abordant un volet d'éco-conception limité, qualifié d'éco-dimensionnement [62]. Ils se concentraient sur la recherche de méthodologies d'optimisation de paramètres dimensionnels ou de matériaux en vue de trouver un optimum sur cycle de vie pour des convertisseurs électromagnétiques. Celles-ci sont exposées de façon détaillée (on présentera le cas du transformateur monophasé, le cas du moteur électrique monophasé et le cas du moteur électrique triphasé).

Un nombre plus important d'études existe sur les éco-technologies et l'éco-efficacité énergétique des systèmes électriques dans le but d'améliorer l'empreinte écologique mondiale. Il convient d'en exploiter quelques –unes.

1.4.1. Expériences d'éco-dimensionnement

i. Cas d'un transformateur monophasé

Dans l'article [63], les auteurs ont considéré le cas d'un transformateur monophasé alimenté à tension et fréquence fixes pour poser le problème d'optimisation qui a été basé sur un algorithme génétique évolutionnaire. Les objectifs à minimiser sont l'énergie primaire cumulée sur cycle de vie et la masse totale des parties actives (circuit magnétique et bobinage), pour la fourniture de 200 VA pendant 5 heures par jour pendant 7 ans. Les résultats présentés à la figure 1-8 montrent un premier résultat d'optimisation des dimensions et du nombre de spires en supposant le régime permanent thermique atteint instantanément.

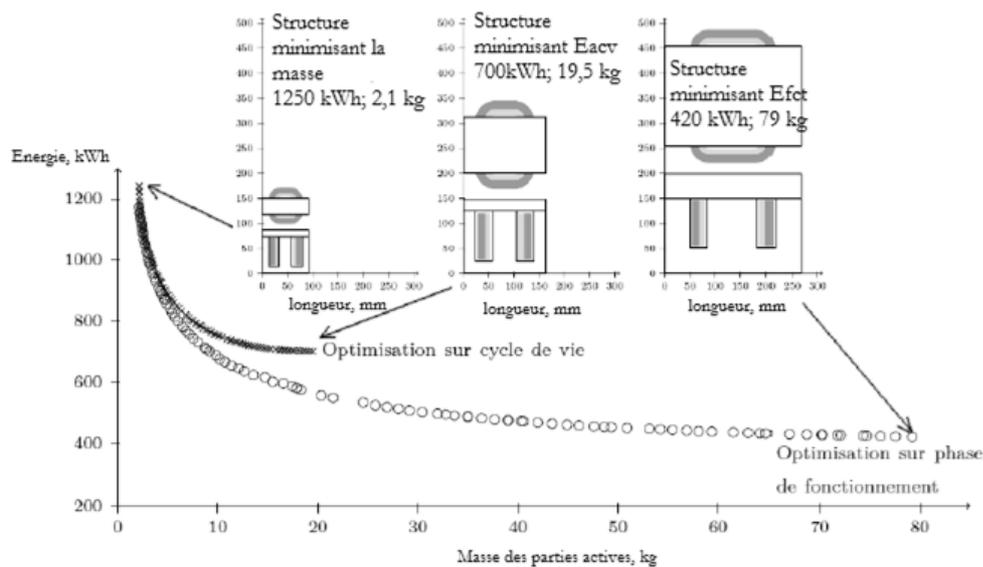


Figure 1-8. Paramètres du transformateur et fronts de Pareto obtenus (Debusschere, [62])

Ces résultats présentent les solutions obtenues dans une optimisation « classique » avec minimisation des seules pertes de fonctionnement et les solutions obtenues avec une optimisation sur le cycle de vie incluant la dépense d'énergie pour la production des matériaux. Les solutions extrêmes de l'optimisation « classique » correspondent aux limites d'échauffement (masse minimale) et aux limites dimensionnelles autorisées (masse maximale). Par contre, la solution optimale sur cycle de vie de masse intermédiaire correspond à un compromis entre pertes énergétiques cumulées et investissement énergétique. Les mêmes auteurs ont mis en évidence l'importance des conditions de charge et la durée de vie du transformateur sur son éco-efficacité énergétique globale. Ils ont montré à travers la figure 1-9 les effets de la durée de fonctionnement (2,5 à 10h par jour) dans les résultats d'optimisation. Ils ont constaté que la masse optimale est faible pour des transformateurs qui ont une durée moyenne de fonctionnement quotidien petite.

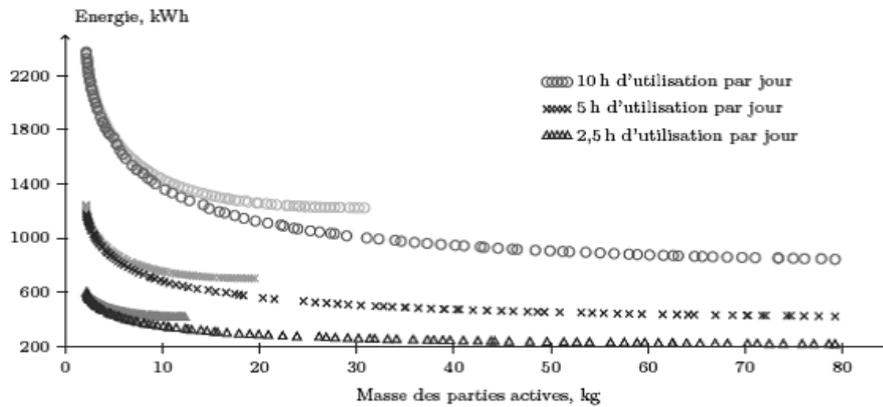


Figure 1-9. Effet de la durée de fonctionnement sur les solutions optimales minimisant les pertes (Debusschere, [62])

ii. Cas d'un moteur électrique monophasé

Il s'agit cette fois d'un moteur asynchrone monophasé (diphasé à condensateur). Il est destiné à un actionneur de volet roulant. Le réducteur de vitesse auquel il est associé ainsi que tout le système mécanique sont imposés ; les seuls paramètres disponibles sont la longueur active (associée à la masse), le nombre de spires du bobinage et le condensateur de déphasage. L'alimentation est directe (230 V – 50 Hz), monophasée avec condensateur permanent de déphasage. Les auteurs, dans [64-65], ont mis en évidence l'existence d'un optimum de longueur active (et donc de quantité de matériaux) pour minimiser l'énergie primaire consommée sur le cycle de vie alors que la recherche d'un maximum de rendement sur le cycle de fonctionnement conduisait à une quantité de matière active beaucoup plus grande pour minimiser les pertes électriques (Joule et magnétiques). La figure 1-10 montre quelques résultats, l'énergie primaire totale est minimale pour une longueur utile de 60 mm alors que pour cette longueur, le rendement est tout à fait médiocre.

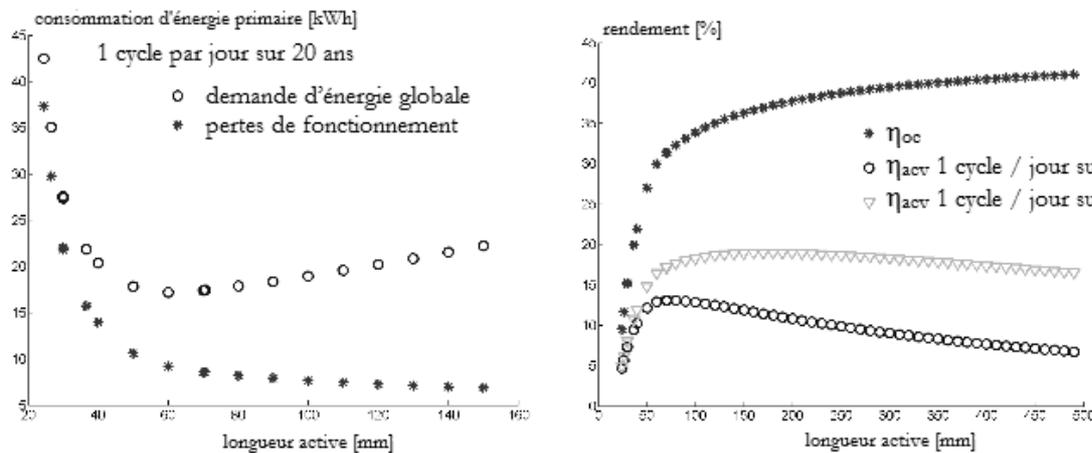


Figure 1-10. Effet de la longueur active sur l'énergie primaire consommée sur le cycle de vie et sur les pertes de conversion (à gauche). Rendements (à droite) sur un cycle de montée-descente (η_{oc}) et sur cycle de vie (η_{act}) en fonction de l'usage (Debusschere, [62])

iii. Cas d'un moteur asynchrone à vitesse variable

L'étude décrite ci-dessus a été aussi appliquée à une machine asynchrone triphasée à cage alimentée sous tension et fréquence variables. L'article [66] propose les résultats obtenus lors de cette étude comparative de deux types d'optimisations opposant l'énergie perdue à la masse totale des parties actives pour plusieurs temps d'utilisation. La première porte sur l'énergie globale sur le cycle de vie totale et la seconde sur les seules pertes de

fonctionnement. Les auteurs remarquent, d'après la figure 1-11, qu'il n'est pas possible d'atteindre des solutions technologiques d'aussi forte masse en minimisant l'énergie sur cycle de vie qu'en minimisant uniquement les pertes de fonctionnements. Ils expliquent ceci par le fait que la consommation d'énergie primaire est proportionnelle à la masse.

L'algorithme génétique utilisé lors de cette étude d'optimisation, élimine naturellement les solutions dont la masse rend l'énergie globale sur cycle de vie trop importante ; l'écart entre les courbes s'accroît avec l'augmentation de la masse de la machine. Les auteurs concluent que l'analyse sur cycle de vie se trouve à même de proposer des dimensionnements différents de ceux obtenus par l'intermédiaire de l'optimisation classique. Les résultats dépendent fortement des conditions d'utilisation du convertisseur électromécanique, tel que le profil de charge incluant la durée d'utilisation cumulée, ainsi que des importances respectives des différents coûts énergétiques élémentaires.

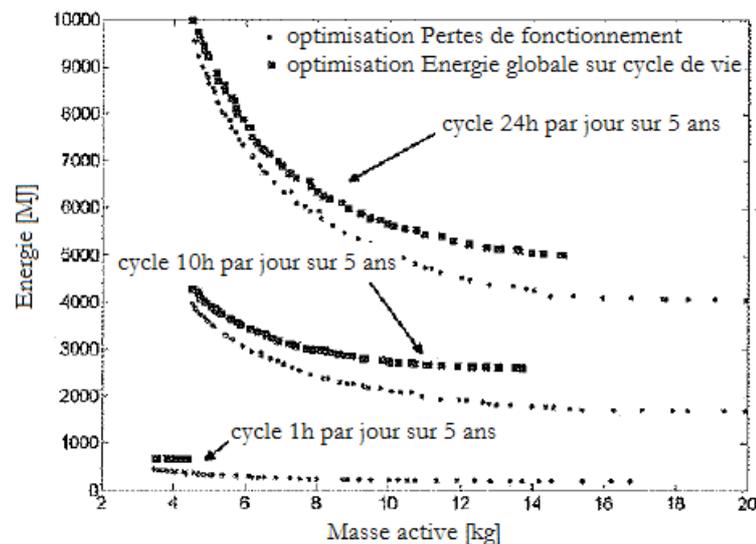


Figure 1-11. Comparaison d'optimisations opposant masse et énergie pour plusieurs temps d'utilisation. Machine fonctionnant à $1N.m$ et $3000 \text{ tr. min}^{-1}$ (Debusschere, [66])

1.4.2. Eco-efficacité énergétique

L'éco-efficacité énergétique est devenue une qualité essentielle des nouveaux produits et systèmes industriels. Elle seule peut réduire l'impact environnemental du produit considéré en termes de CO_2 émis. Techniquement et juridiquement, le marché de l'électrotechnique est très complexe, chaque appareil électrique devant satisfaire à des exigences différentes selon son application, sa sécurité et sa compatibilité avec d'autres appareils. Ces exigences font l'objet de réglementations, de procédures ou de normes au niveau international. Les initiatives de normalisation ont débouché sur l'harmonisation des exigences en matière de rendement énergétique, de méthodes d'essais et de certifications dans un certain nombre de domaines, notamment celui des moteurs électriques. Aujourd'hui, tous les grands organismes de normalisation et institutions internationales collaborent pour définir des référentiels communs permettant de comparer la consommation énergétique des produits et des systèmes. Pendant des années, deux référentiels faisaient autorité dans le monde : la norme CEI 60034-2 et la norme IEEE 112, méthode B (ou IEEE 112-B). La première était surtout appliquée en Europe, en Inde et en Chine, ainsi qu'en Australie et en Nouvelle-Zélande ; la seconde avait cours en Amérique du Nord et dans les pays où le réseau fonctionnait à 60 Hz. En 2000, l'Australie et la Nouvelle-Zélande introduisirent une méthode semblable à celle de l'IEEE 112-B, tout en conservant la CEI 60034-2. Le Canada, pour sa part, adopta une norme équivalente (CSA C390). La figure 1-12 illustre l'historique et la géographie des normes et marquages de rendement des moteurs. En 2008, une norme internationale des nouvelles classes de rendement IE1, IE2 et IE3 a été définie et basée sur les classes EFF1 et EFF2 du CEMEP-EU correspondant respectivement aux limites

des classes internationales IE2 et IE1. La classe IE3 pour 50 Hz est dérivée de la classe IE2 avec environ 15 % de pertes en moins. Cette norme exclut les moteurs conçus spécialement pour les applications à vitesse variable (CEI 60034-25) et ceux complètement intégrés dans une machine (ex., pompe ou ventilateur) [67].



Figure 1-12. Historique et géographie des normes et marquages de rendement des moteurs [67]

Plusieurs travaux de recherche existent sur l'éco-efficacité des machines électriques et son amélioration en milieu industriel. A titre d'exemple, Almeida et Ferreira détaillent dans [68-69] l'aspect efficacité énergétique des moteurs électriques en rapport aux normes internationales. L'étude recommande la façon d'améliorer les performances environnementales sur cycle de vie des moteurs en se concentrant sur l'évaluation du coût total du cycle de vie. Il a été constaté que si les moteurs à haut rendement ou de classe premium remplacent des moteurs standards, des réductions significatives de l'impact environnemental seront atteints. Martinez et Andrada ont aussi présenté dans [70] une analyse des coûts environnementaux du cycle de vie d'une machine à reluctance variable. L'analyse a été effectuée conformément à la directive EUP 2005/32/EC et en suivant la méthodologie de l'éco-conception. L'étude a retenu une machine de puissance 1,5 kW qui peut être considérée comme représentative de la gamme de puissance de petite taille. Cette analyse montre que l'utilisation de la machine à reluctance variable pourrait générer d'importantes économies énergétiques pendant la phase d'usage en comparant par rapport à l'utilisation du moteur asynchrone. Dans la littérature scientifique, il y a d'autres articles qui discutent la problématique d'accroissement de l'éco-efficacité énergétique et son rôle important dans l'amélioration de l'empreinte environnementale globale.

1.4.3. Écotechnologies

Après les technologies de l'information et de la communication (TIC) et les biotechnologies au cours des dernières décennies, les écotechnologies apparaissent aujourd'hui comme la nouvelle frontière de la technologie. En effet, face aux multiples défis environnementaux auxquels est soumise notre planète, il est devenu indispensable de "réinventer" de nombreux processus industriels, des produits et des services. Les perspectives économiques sont considérables. Pour cela, on trouve aujourd'hui plusieurs travaux de recherche qui s'intéressent à l'utilisation d'écotechnologies dans la fabrication des machines électriques dont on peut citer quelques-uns.

Keulenaer [71] dans son article compare l'impact environnemental d'une cage du rotor en aluminium à celle en cuivre en se basant sur l'étude d'ACV d'un moteur asynchrone triphasé. L'auteur conclut qu'il y a deux avantages à remplacer l'aluminium par le cuivre: augmenter le rendement du moteur et réduire les consommations des matériaux et donc le coût. Binesti et Ducreux [72] mesurent et calculent les pertes de fer

d'un moteur asynchrone de 18,5 kW au moyen des méthodes appropriées et améliorent l'estimation de pertes fer. Les résultats montrent qu'une amélioration de 1 à 3 % de l'efficacité est possible par le remplacement des tôles classiques NO d'épaisseur 0,5 mm par d'autres de nuances différentes (par exemple celles à fortes concentration de silicium (6,5 %), de texture cubique partielle, etc.). Les différences entre la mesure et le calcul sont principalement attribuées à la rotation des champs à l'intérieur du stator. Dans le même contexte de travail, Lopez [73] propose une nouvelle structure de circuit magnétique pour les machines asynchrones utilisant des tôles d'acier à grains orientés décalées. Cette structure permet d'améliorer les performances énergétiques de ces machines. Les résultats d'essai sur des prototypes expérimentaux soulignent les différents avantages de cette structure particulière [74]. Le fabricant de roulement SKF a développé un nouveau roulement éco-énergétique destiné aux les moteurs électriques [75] ; avec la nouvelle classe de roulements éco-énergétiques, SKF apporte une réponse concrète aux problématiques industrielles d'économie d'énergie et contribue à réduire sensiblement les émissions de CO₂.

1.5. Conclusion

L'éco-conception est un sujet vaste et qui se décline dans tous les domaines. L'étude bibliographique a permis de faire le point sur les travaux qui ont été faits autour de cette thématique dans le domaine du génie électrique. L'importance d'une telle démarche d'éco-conception sur l'environnement et le développement durable ne peut se comprendre qu'à la lecture de nombreux travaux, des normes internationales, des documents réglementaires et des rapports industriels. Parallèlement à l'utilisation de l'éco-conception faite par le monde industriel et les organismes institutionnels, il est intéressant que le monde de la recherche apporte sa contribution, forcément différente et complémentaire. Des travaux de recherche qui contribuent au développement de cette approche sont nombreux dans le domaine du génie chimique, mécanique, textile. Ils sont plus rares dans le domaine du génie électrique, en particulier pour les systèmes électrotechniques complexes tels que les machines électriques.

La conception des motorisations électriques est généralement optimisée sur la base de critères tels que le coût d'investissement, la durée de vie, la puissance massique... Ces approches sont incomplètes et ne prennent pas en compte les performances énergétiques globales et l'impact environnemental de la motorisation sur l'ensemble du cycle de vie des machines qui la composent (bilan énergétique global, quantification des émissions de gaz à effet de serre et des déchets). Le développement d'un outil facilitant la démarche d'éco-conception des motorisations électriques en milieu industriel aura des retombées positives à moyen et long terme car les motorisations électriques correspondent à une part importante de l'électricité consommée dans les entreprises. Dans le chapitre suivant, la démarche d'éco-conception décrite sera appliquée aux motorisations électriques et plus particulièrement à la machine asynchrone triphasée car elle est la plus répandue dans l'industrie.

Chapitre 2 :
Ecobilan global d'une machine
asynchrone

2. Ecobilan global d'une machine asynchrone

2.1. Introduction

D'un point de vue scientifique, la démarche de conception des machines électriques repose sur les lois de l'électromagnétisme [76-77] et celles qui régissent les transferts thermiques [78]; des connaissances en mécanique et en résistance des matériaux sont également nécessaires [79]. Dans ce chapitre, les règles générales de l'éco-conception sont appliquées au cas particulier de la conception des machines électriques et plus particulièrement celle de la machine asynchrone. Cela implique de prendre en compte l'ensemble des composants constituant la machine sur l'intégralité de son cycle de vie : fabrication, usage et démantèlement-recyclage. Moyennant quelques hypothèses sur le temps et le type d'usage (continu, intermittent,...) et, à condition d'estimer via une modélisation adéquate le rendement d'une machine en développement, on peut estimer son empreinte environnementale pendant la phase d'usage.

Ce chapitre comprend quatre parties. La première partie détaille les éléments nécessaires à l'éco-conception : l'inventaire des matières et de l'énergie, le profil de fonctionnement, etc. La motorisation de référence qui illustre la partie concrète de travail est également présentée. La deuxième partie s'intéresse à la modélisation géométrique et électrique de la machine, cela suppose de calculer les masses de chaque composant constituant la machine et les pertes énergétiques pour un régime imposé par une charge mécanique. La troisième partie présente la méthode d'évaluation des impacts environnementaux et les outils utilisés. Au final, les résultats de la démarche d'éco-conception basée sur l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) de la machine de référence sont exposés et interprétés selon différents scénarios de fonctionnement.

2.2. Mise en place à l'éco-conception

2.2.1. Choix de la motorisation de référence

Ce travail porte sur le moteur asynchrone triphasé à cage qui est le moteur le plus répandu dans l'industrie. La démarche est transposable à d'autres machines électriques. Le concept de motorisation électrique inclut une analyse fonctionnelle du système pour lequel cette motorisation est nécessaire. Le cas de motorisations utilisant des convertisseurs électroniques de puissance est exclu a priori de l'étude qui se limitera aux moteurs électriques directement connectés au réseau. La gamme de puissance visée est comprise entre 0,75kW et 300kW.

Cette étude s'attache à présenter des exemples détaillés et, plus particulièrement, le cas d'une machine de 10 kW existante. Elle sera dénommée « machine de référence », et elle sera tour à tour modélisée et reconçue selon des objectifs d'amélioration environnementale. La décision du choix de la motorisation de référence a été prise en concertation avec les différents partenaires de ce projet (ADEME et EDF). Le choix de la puissance est basé sur les moyens matériels existants au laboratoire d'accueil. En effet, le LSEE disposait déjà d'un banc d'essais de machines asynchrones dans la gamme de puissance 10 kW permettant de mener les expérimentations nécessaires durant la thèse.

2.2.2. Inventaire de matières et d'énergie

i. Constitution d'une machine

La structure générale de la machine asynchrone est restée inchangée depuis de nombreuses années comme le montre la figure 2-1. La partie active comprend le circuit magnétique, le bobinage et la cage d'écuréuil. La partie inactive regroupe le reste des éléments: carter et flasques, arbre et roulements, ventilateur et capot, boîte de raccordement. Les phénomènes fondamentaux d'électromagnétisme qui définissent le principe de fonctionnement de la machine sont créés dans la partie active. La partie inactive assure les fonctions secondaires (protection, ventilation,...). Une démarche d'éco-conception de la machine électrique prend obligatoirement en compte les deux parties. Chaque composant apporte sa propre contribution à l'écobilan global de la machine électrique et on ne doit, a priori, négliger aucun élément.

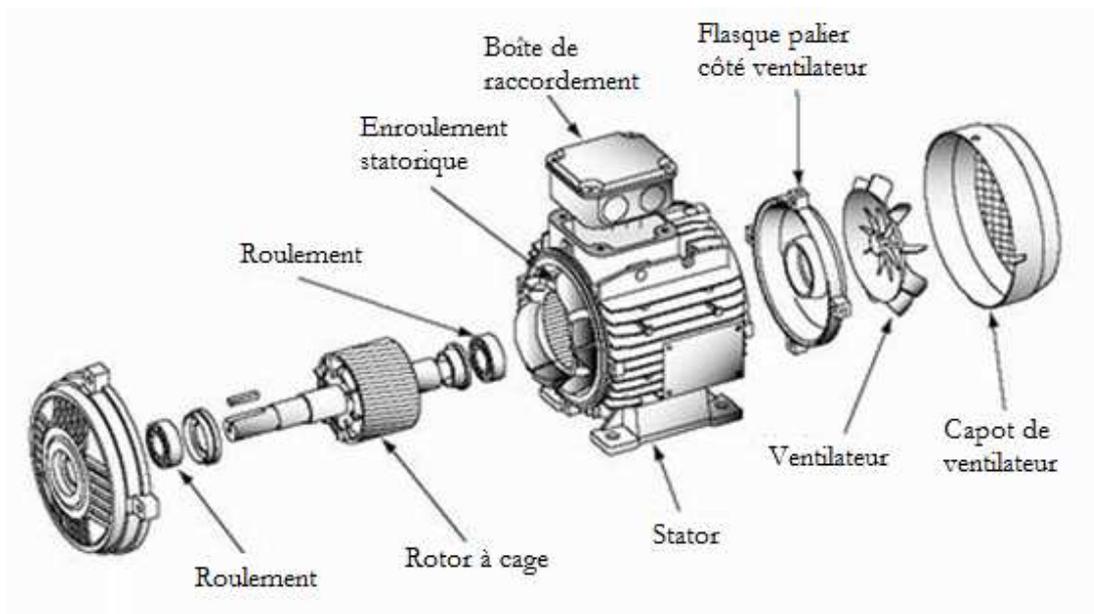


Figure 2-1. Organisation d'une machine asynchrone à cage d'écuréuil (ancien dessin issu du site d'Energie+, [80])

ii. Processus de production

Produire un moteur électrique nécessite principalement de l'acier, du cuivre, de l'aluminium, des matériaux isolants, des matières plastiques et des outils industriels adaptés à la production de masse (cf. figure 2-2). Différents processus industriels (laminage, recuit, décapage, tréfilage, injection, moulage, ...) sont utilisés lors de la production de chaque composant de la machine. Ils impliquent, entre autres, des émissions de polluants spécifiques à la fabrication des machines électriques, comme les solvants utilisés pour traiter l'isolation des fils et l'imprégnation des bobines de cuivre. Tous ces processus ont des impacts environnementaux variés tant sur la phase de construction que sur la phase de démantèlement et de recyclage. Au cours de son usage, si on néglige l'usure des roulements, une machine électrique ne subit aucune modification matérielle ; ces impacts seront donc neutres pendant cette phase.

Chaque élément constituant le moteur (cf. figure 2-2) consomme pour sa fabrication des ressources (matières premières : minerais ou matière recyclée, pétrole ...) et produit divers déchets (émissions dans l'air, l'eau et le sol). L'utilisation de bases de données spécifiques quantifiant tout cela est un passage obligé (cette étude a retenu Ecoinvent) mais pas suffisant, notamment lorsqu'il a fallu modéliser des processus spécifiques aux machines électriques. Ainsi, les données relatives à la fabrication des tôles magnétiques et des fils émaillés utilisés dans la conception de machine de référence ont été obtenues en collaboration avec nos partenaires industriels. Dans

l'annexe A, page 144, à titre d'exemple, une modélisation des processus de la fabrication des fils émaillés à partir des données fournies par un expert de la production des fils émaillés, est présentée.

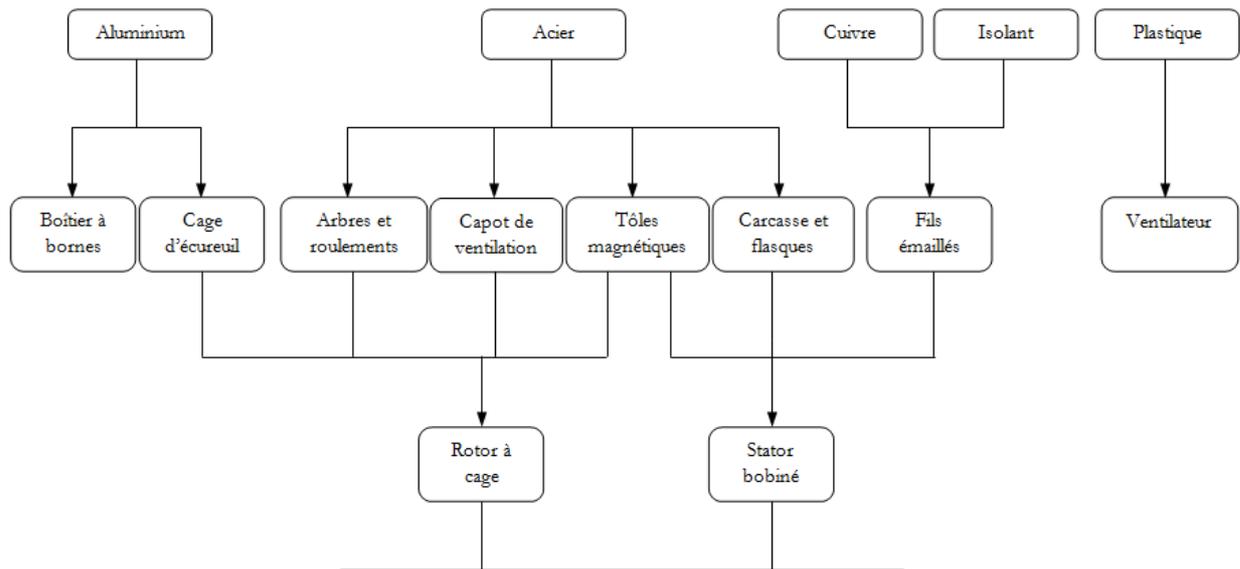


Figure 2-2. Ressources nécessaires pour fabriquer la machine de référence

iii. Matériaux et recyclage

Au cours des années précédentes, la politique européenne des déchets s'est traduite, entre autres, par la mise en place de filières fondées sur la responsabilité élargie des producteurs (REP), dédiées à la valorisation des produits en fin de vie (piles & accumulateurs, emballages, équipements électriques, etc.) par la réutilisation, le recyclage ou la récupération d'énergie. Les filières les plus récentes, consacrées aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), n'ont démarré leur activité en France que fin 2006. Le taux de recyclage de DEEE n'a pas dépassé 10 % en 2007 à cause de cette mise en place tardive de la filière [81]. La majorité des équipements électriques, en particulier les moteurs électriques, sont effectivement démontés et recyclés. Le Tableau 2-1 affiche le taux de recyclage retenu pour notre étude des principaux matériaux utilisés dans une machine électrique.

Tableau 2-1. Pourcentage du recyclage des matériaux (ADEME [81] & Ecoinvent [82])

<i>Matériau recyclé</i>	<i>Taux de recyclage</i>
Acier ordinaire	45 %
Acier électrique	45 %
Aluminium	70 %
Cuivre	70 %
Papier	34 %
Plastique mixte	20 %
PE	20 %
PET	20 %
PP	20 %
PS	20 %
PVC	20 %

Ces chiffres sont issus de la base de données Ecoinvent et modifiés (en ce qui concerne le cuivre et l'aluminium) par le rapport du recyclage de l'ADEME [81]. Chaque matière constituant le moteur est en partie recyclée, en partie incinérée et en partie enfouie. Les taux retenus d'incinération et d'enfouissement de déchets restants après recyclage sont respectivement 53 % et 47 % de masse de matériaux considérés [82].

2.2.3. Phase de fonctionnement

i. Durée de vie d'un moteur électrique

Globalement, les moteurs asynchrones à cage sont des machines robustes et fiables qui ne demandent que peu d'entretien. Leur durée de vie est influencée par divers facteurs comme le nombre d'heures de fonctionnement, le facteur de charge (y compris les cas de surcharge), la fréquence des cycles de démarrage et de freinage, la qualité de puissance et les conditions environnementales (température, vibrations, humidité, pollutions chimiques...). L'estimation de la durée de vie moyenne d'une machine asynchrone à cage d'écureuil en fonction de la puissance nominale, en incluant la réparation et la maintenance, est illustrée dans le Tableau 2-2.

Tableau 2-2. *Durée de vie moyenne d'un moteur à cage en Europe (rapport d'EuP, [69])*

<i>Gamme de puissance</i>	<i>Durée de vie (ans)</i>
1,0 – 7,5 kW	12
7,5 – 75 kW	15
75 – 250 kW	20

Pour certaines utilisations, la durée de vie des moteurs électriques est supérieure à celle des équipements dans lesquels ils sont intégrés. Pour les équipements pérennes, des entretiens préventifs prolongent la durée de vie des machines et limitent les risques d'interruptions de service imprévues et de pertes de production. Les moteurs fonctionnant en permanence dans des conditions de service normales devront être révisés en moyenne tous les cinq ou six ans. Les moteurs fonctionnant dans des conditions plus difficiles devraient être révisés plus fréquemment [83]. Dans le cas de moteurs peu utilisés, l'intervalle de temps entre révisions peut être prolongé en conséquence. 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. Dans la littérature [84-85], des statistiques concernant les défauts qui apparaissent au cours de fonctionnement de la machine à cage, permettent un classement en quatre catégories :

- Défauts électriques au stator : 38%
- Défauts électriques au rotor : 10%
- Défauts de roulements : 40%
- Autres types de défauts : 12%

Les causes de ces défauts sont multiples ; elles peuvent être d'origine thermique, électrique, mécanique et environnementale [86]. Notons que l'estimation du vieillissement des isolants, aussi bien suite à des contraintes thermiques que des contraintes électriques ou mécaniques et à la fatigue mécanique des roulements due aux variations, ont fait l'objet de plusieurs travaux scientifiques [87-88] et de rapports industriels [89]. La maintenance et les défaillances peuvent avoir des coûts environnementaux indirects sur la phase de fonctionnement de la machine.

ii. Types de service d'un moteur électrique

L'éco-conception des moteurs électriques est basée sur la connaissance du cycle de fonctionnement durant la phase d'usage. Ce cycle de fonctionnement définit le rapport du temps de sollicitation de la machine sur sa durée totale de fonctionnement et son type de service. En effet, les moteurs triphasés asynchrones sont conçus pour fonctionner à la puissance nominale de façon permanente. Or, en pratique, certains moteurs ne fonctionnent que pendant une brève période, d'autres tournent toute la journée mais avec une faible charge, et de nombreux moteurs doivent accélérer sous de fortes inerties ou sont commandés en mode commuté et freinés électriquement. Dans tous ces divers types de service, un moteur a nécessairement une consommation énergétique et un comportement thermique différent de celui d'un service continu. Lors de la conception, les

informations relatives au type de service doivent être les plus précises possibles étant donné que le rendement réel peut être considérablement différent du rendement nominal défini en service continu. Nous vérifierons dans la suite de ce chapitre que ces données relatives aux types de service peuvent représenter un premier critère de classification des applications en termes d'objets d'études plus ou moins intéressants pour l'éco-conception. Les différents types de service ont été spécifiés dans la norme CEI 60034-1 [90]. La plupart des cas qui se présentent dans la pratique peuvent être ramenés à l'un de ces types de service.

Service continu - Service type S1 fonctionnement à charge constante nominale d'une durée suffisante pour que l'équilibre thermique soit atteint. Les paramètres de service sont le facteur de marche ($F = 1$) et le nombre de démarrages équivalent par heure ($c \leq 6$).

Service temporaire - Service type S2 fonctionnement à charge constante nominale pendant un temps déterminé N , inférieur que celui requis pour atteindre l'équilibre thermique, suivi d'un repos d'une durée suffisante pour rétablir, à 2° C, près l'égalité de température entre la machine et le fluide de refroidissement, le facteur de marche F dépend du cahier des charges et le paramètre c vaut 1.

Service intermittent périodique - Service type S3 suite de cycles de service identiques comprenant chacun une période de fonctionnement à charge constante nominale N et une période de repos R . Dans ce service, le cycle est tel que le courant de démarrage n'affecte pas l'échauffement de façon significative. $F = N/(N+R)$ et $c = 0$.

Service intermittent périodique à démarrage - Service type S4 suite de cycles de service identiques comprenant une période appréciable de démarrage D à forte inertie, une période de fonctionnement à charge constante nominale N et une période de repos R . $F = (N+D)/(N+D+R)$ et c selon le cahier des charges.

Service intermittent périodique à freinage électrique - Service type S5 Suite de cycles de service périodiques comprenant chacun une période de démarrage D , une période de fonctionnement à charge constante nominale N , une période de freinage électrique rapide F et une période de repos R . $F = (N+D+F)/(N+D+F+R)$ et c selon le cahier des charges.

Service ininterrompu périodique à charge intermittente - Service type S6 Suite de cycles de service identiques comprenant chacun une période de fonctionnement à charge constante nominale N et une période de fonctionnement à vide V . Il n'existe pas de période de repos. $F = N/(N+V)$ et $c = 0$.

Service ininterrompu périodique à freinage électrique - Service type S7 Suite de cycles de service identiques comprenant chacun une période de démarrage D , une période de fonctionnement à charge constante L et une période de freinage électrique F . Il n'existe pas de période de repos. $F = 1$ et c selon cahier des charges.

Service ininterrompu périodique à changements liés de charge et vitesse - Service type S8 Suite de cycles de service identiques comprenant chacun une période de fonctionnement à charge constante $L1$ correspondant à une vitesse de rotation prédéterminée, suivie d'une ou plusieurs périodes de fonctionnement à d'autres charges constantes $L2$ $L3$ correspondant à différentes vitesses de rotation. Il n'existe pas de période de repos. $F = 1$ et c selon le cahier des charges.

Service à variations non périodiques de charge et de vitesse - Service type S9 Service dans lequel la charge et la vitesse ont une variation non périodique dans la plage de fonctionnement admissible. Ce service inclut fréquemment des surcharges appliquées qui peuvent être largement supérieures à la pleine charge. Pour ce service type, des valeurs appropriées à pleine charge devront être considérées comme bases du concept de surcharge. $F = 1$ et c selon le cahier des charges.

Service à régimes constants distincts - Service type S10 Service comprenant au plus quatre valeurs distinctes de charges (ou charges équivalentes), chaque valeur étant appliquée pendant une durée suffisante pour que la machine atteigne l'équilibre thermique. La charge minimale pendant un cycle de charge peut avoir la valeur zéro (fonctionnement à vide ou temps de repos). $F = 1$ et $c = 0$.

iii. Puissance d'un moteur électrique

En dehors du service continu qui correspond à un équilibre thermique de la machine, la notion de puissance nominale n'a pas vraiment de sens, si on ne lui associe pas tout ce qui caractérise les conditions d'emploi et qui forme le service nominal [91]. A part ce cas simple, il n'est pas aisé de définir la puissance nominale, car ce concept fait intervenir un grand nombre de paramètres, tels que les temps de fonctionnement en charge, de démarrage et de freinage ; la durée des cycles et l'inertie des masses tournantes. Il est possible de diviser les types de service S1 à S10 en deux groupes, selon qu'une augmentation ou réduction de la puissance réelle qu'il est possible d'obtenir par rapport à S1 [92]. Etant donné que dans les types de service S2, S3 et S6, la machine n'est pas actionnée continuellement à pleine charge, mais uniquement par intermittence, elle peut refroidir de nouveau pendant le temps d'inactivité, et s'échauffer au cours de la période de charge. Une augmentation de puissance par rapport à la puissance nominale définie en service S1, est possible pour ces types de services. Dans les types de service S4, S5, S7, S8, S9 et S10, la puissance du moteur devra au contraire être réduite dans la plupart des cas étant donné que les pertes au démarrage ou au freinage jouent un rôle essentiel.

2.3. Modélisation de la machine asynchrone : application à la machine de référence

La machine de référence est une machine asynchrone triphasée à p paires de pôles, avec un rotor à cage d'écureuil. Elle est alimentée directement par un système de tensions triphasées équilibré. Le stator est composé de Z_{es} encoches statoriques avec m encoches par pôle et par phase. Le rotor comprend Z_{er} barres rotoriques. Toutes les valeurs numériques liées à la machine de référence sont données à l'Annexe B, page 151.

Les impacts environnementaux dépendent de la quantité de matières et donc nécessitent la prédétermination de la masse des différents composants de la machine et l'estimation précise de sa performance énergétique au cours du fonctionnement. Des calculs analytiques basés sur la géométrie de la machine en régime permanent ont été ainsi conduits. Ces calculs ne prennent pas en compte les harmoniques de champ et de courant dont les pertes leur incombant ne pourraient être négligées lors d'une étude approfondie. De même, le fait de ne pas tenir compte de la saturation dans les paramètres réduit considérablement le domaine de validité du modèle analytique. Le modèle analytique est donc complété par une simulation numérique.

2.3.1. Géométrie de la machine

La géométrie du stator et du rotor de la machine électrique est schématisée par la figure 2-3 qui précise les principales cotes. On note ainsi par d_{is} et d_{ir} respectivement le diamètre d'alésage et le diamètre de l'arbre rotorique, par e_{es} et e_{er} respectivement l'épaisseur de la culasse statorique et rotorique, par h_{es} , h_{er} et h_e respectivement les hauteurs d'encoche statorique, d'encoche rotorique et d'entrefer et, enfin, par L_a la longueur active du circuit magnétique.

Le diamètre d'alésage d_{is} et la longueur active du circuit magnétique L_a représentent les paramètres fondamentaux pour le dimensionnement d'une machine électrique. Toutes les autres dimensions sont déduites à partir de ces paramètres en utilisant les données réelles liées au type de matériaux utilisés et à l'aide des certains coefficients pour garder l'aspect réel de la géométrie [93-94].

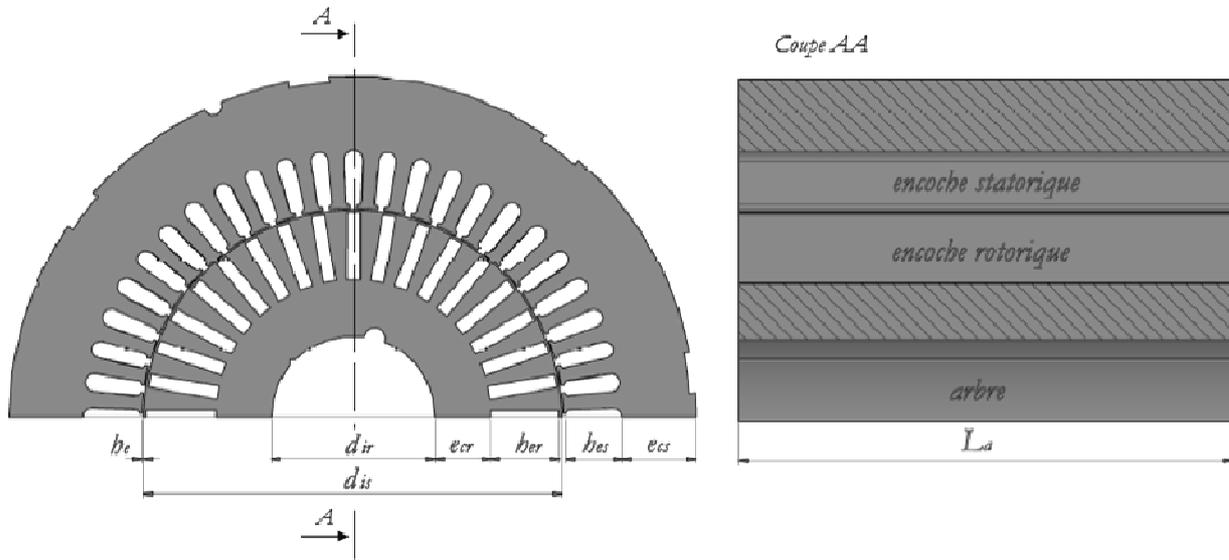


Figure 2-3. Représentation de la géométrie d'un moteur asynchrone, les encoches rotorique sont fermées

Afin de simplifier les expressions analytiques, on définit le diamètre extérieur au stator d_{es} et au rotor d_{er} , le diamètre de fond d'encoche au stator d_{fs} et au rotor d_{fr} .

Leurs expressions sont données par les équations suivantes :

$$d_{es} = d_{is} + 2h_{es} + 2e_{cs} \quad d_{er} = d_{is} - 2h_e \quad d_{ir} = d_{er} - 2h_{er} - 2e_{cr} \quad (2.1)$$

$$d_{fs} = d_{is} + 2h_{es} \quad d_{fr} = d_{ir} + 2e_{cr} \quad (2.2)$$

Les relations analytiques nécessaires à la conception de la machine sont données en détail dans l'Annexe B, page 147.

2.3.2. Calcul des masses

Le calcul des différentes dimensions de la machine asynchrone permet de déterminer la masse de chaque composant comme étant le produit de son volume (m^3) et la masse volumique associée (kg/m^3).

$$masse_{totale} = \sum_{\substack{\text{composant } (i) \\ \text{de la machine}}} volume_{(i)} \cdot masse\ volumique_{(i)} \quad (2.3)$$

i. Masse des parties actives

Il s'agit de déterminer la masse des tôles magnétiques, du bobinage et de la cage d'écuriel. Notons tout d'abord par S_{es} la surface totale de la culasse statorique et par S_{er} la surface totale de la culasse rotorique. D'après la schématisation présentée par la figure 2-3, on a :

$$S_{cs} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{es}^2 - d_{fs}^2) \quad S_{cr} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{fr}^2 - d_{ir}^2) \quad (2.4)$$

On définit par S_{es} la surface totale d'encoche statorique et par S_{er} la surface totale d'encoche rotorique. Leurs expressions sont exprimées par l'équation (2.5). Notons que b_{es} et b_{er} représentent respectivement la largeur moyenne d'encoche statorique et rotorique.

$$S_{es} = Z_{es} \cdot h_{es} \cdot b_{es} \quad S_{er} = Z_{er} \cdot h_{er} \cdot b_{er} \quad (2.5)$$

D'après la schématisation illustrée dans la figure 2-3 et à l'aide des équations (2.4) et (2.5), on déduit les surfaces totales de dents statoriques S_{ds} et rotoriques S_{dr} comme suit:

$$S_{ds} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{es}^2 - d_{is}^2) - S_{es} - S_{cs} \quad S_{dr} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{er}^2 - d_{ir}^2) - S_{er} - S_{cr} \quad (2.6)$$

La masse totale de tôles magnétiques m_{tm} utilisées dans la machine de référence est calculée par l'équation (2.7), sachant que Q_f est la masse volumique de fer électrique et k_{tm} est le coefficient de foisonnement qui prend en compte l'épaisseur des couches isolantes séparant les tôles magnétiques et les petits défauts de planéité.

$$m_{tm} = Q_f \cdot (S_{cs} + S_{ds} + S_{cr} + S_{dr}) \cdot k_{tm} \cdot L_a \quad (2.7)$$

La masse de cuivre utilisée dans le bobinage statorique m_b est calculée à l'aide de l'équation (2.8). Sachant que Q_{cu} est la masse volumique de cuivre, l_b est la longueur totale de fil constituant le bobinage statorique (calculé en Annexe B) et d_{cu} est le diamètre équivalent de fil de cuivre émaillé utilisé dans la machine de référence (calculé en fonction de la température interne maximale définie par la classe d'isolation de la machine).

$$m_b = \pi \cdot \frac{l_b \cdot d_{cu}^2 \cdot Q_{cu}}{4} \quad (2.8)$$

La masse d'aluminium constituant la cage d'écoreuil m_{ce} (les barres et les deux anneaux) est déterminée par l'équation (2.9). Notons que k_i est un coefficient qui tient compte de l'inclinaison des barres rotoriques (calculé dans l'Annexe B), b_a est la largeur de l'anneau de court-circuit des barres et enfin Q_{al} est la masse volumique d'aluminium.

$$m_{ce} = Q_{al} \cdot \left(k_i \cdot L_a \cdot S_{er} + \frac{\pi \cdot (d_{er}^2 - d_{fr}^2)}{4} \cdot b_a \right) \quad (2.9)$$

ii. Masse des parties inactives

La partie inactive de la machine comprend la carcasse qui permet le positionnement du circuit magnétique et la transmission des forces. Elle se présente comme un cylindre creux sur lequel des ailettes de refroidissement sont montés. On retrouve aussi l'arbre rotorique qui repose sur des paliers via des roulements montés dans les flasques fixés à la carcasse, le ventilateur fixé en bout de l'arbre et protégé par un capot de ventilation.

Enfin, la boîte à bornes protège les raccordements des phases de la machine. Il va s'ajouter à tous ces composants, le système d'isolation global qui comprend les isolants des fils émaillés et de fonds d'encoches et le vernis d'imprégnation final. Il est à noter qu'on ne prend pas en compte la fixation du moteur ni le câble d'alimentation en cuivre qui peut avoir une influence non négligeable, s'il est assez long, sur l'ACV en particulier lorsque la machine fonctionne en régimes intermittents à courte durée.

Du point de vue ACV, chaque composante listée précédemment a un impact environnemental, relativement au type de matériau et à sa masse, durant sa construction et sa fin de vie. Il convient donc de les prendre en considération dans l'étude environnementale globale de la machine.

L'estimation théorique de la masse de chaque composante de la partie inactive à partir des données géométriques liées à la partie active d'une machine est délicate, du fait notamment de la variété des spécificités technologiques de construction [8]. Une modélisation simplifiée des parties inactives spécifiques à notre machine de référence et transposable à d'autres machines de même gamme de puissance est proposée dans l'Annexe B afin de prédire un ordre de grandeur relative à la masse de chaque composant inactif de la machine.

2.3.3. Calcul des paramètres électriques

L'objectif principal de la démarche de conception est d'être capable, à partir de la géométrie d'une machine électrique et des caractéristiques des matériaux qui la composent, de prédire les performances énergétiques de la machine en fonction des conditions d'alimentation (fréquence, tension, glissement) et du type de service (S1...S10). Pour cela, il s'agit d'utiliser un modèle de la machine. Le modèle le plus simple en régime permanent est le schéma équivalent monophasé; il faut donc estimer les différentes résistances et réactances modélisant la machine de référence.

i. Méthode analytique basée sur la géométrie de la machine

Le modèle linéaire [95-98] qui est basé sur des relations analytiques fondamentales de dimensionnement des moteurs asynchrones permet de déterminer les principales caractéristiques du moteur. Ce modèle débute par la détermination des paramètres et des dimensions du circuit magnétique; suivent ensuite le calcul du bobinage, des paramètres du circuit électrique. On peut ainsi établir le rendement et le couple électromagnétique. Mais son défaut est de ne pas prendre en compte la saturation.

La modélisation numérique par éléments finis, présentée dans [99-101], offre une deuxième possibilité pour caractériser la machine électrique en prenant en compte certains phénomènes complexes comme, par exemple, la saturation, l'effet de peau, etc. Ces deux méthodes fournissent des informations complémentaires. Par exemple, O. Sahraoui [102] définit les paramètres du schéma équivalent à partir des résultats de Flux2D, et tente d'utiliser les avantages des deux approches sans en subir les inconvénients.

La méthode du calcul analytique nous permet d'effectuer une estimation des paramètres du schéma équivalent monophasé de la machine étudiée en utilisant sa géométrie. Afin de garder un œil critique sur les résultats analytiques, nous avons simulé avec un logiciel d'éléments finis la même structure de machine considérée. La validation de la modélisation analytique est réalisée sur un calcul des caractéristiques de fonctionnement de la machine de référence (caractéristique Couple-vitesse, Facteur de puissance, Rendement).

Le schéma monophasé équivalent de la figure 2-4 est la représentation la plus classique de la machine asynchrone. Rappelons la définition de ses éléments: les résistances de la phase statorique (R_s) et de la phase rotorique ramenée au stator (R'_r), la réactance magnétisante (X_μ) et la résistance modélisant les pertes fer (R_μ) et, enfin, les réactances de fuites stator (X_s) et rotor ramenée au stator (X'_r). Le calcul détaillé des éléments du schéma équivalent, à partir de la géométrie de la machine, est reporté en Annexe B, page 147.

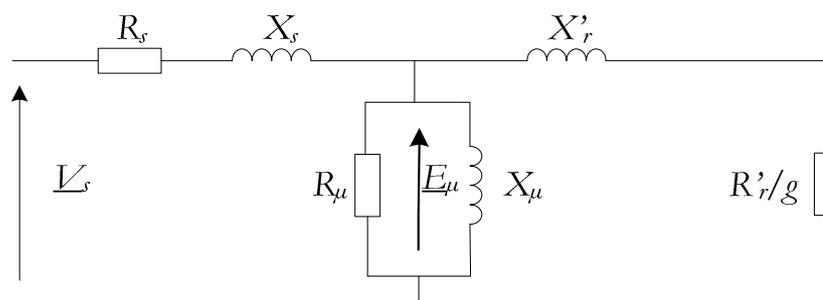


Figure 2-4. Schéma monophasé équivalent avec toutes les réactances de fuites

Les différentes valeurs des éléments du schéma équivalent obtenus à partir des calculs analytiques sont données un peu plus loin dans le paragraphe 2.5.1 page 67, c'est là où on présente les résultats des écobilans globaux. En fait ces données conduisent à une des entrées de l'ACV (énergie perdue) pour obtenir l'écobilan.

ii. Simulation par éléments finis et validation

Le modèle numérique de la machine de référence de 10 kW – 4 pôles est représenté à la figure 2-5 pour un point de fonctionnement nominal. Il est réalisé à partir de la géométrie décrite précédemment en utilisant le logiciel éléments finis Flux2D. La description de la modélisation de la machine asynchrone par éléments finis est présentée dans l'Annexe B. La simulation en alimentation de tension qui a été faite dans ce travail, est en magnéto-harmonique non linéaire (résolution des équations magnétiques en notation complexe). Le non linéarité est défini par une hypothèse définie dans la documentation fournie par CEDRAT. Le couplage des équations électriques aux équations magnétiques est effectué à travers un circuit électrique qui est importé dans le logiciel afin de modéliser les composantes électriques de moteur.

L'effet de la saturation dans le circuit magnétique est pris en compte dans le calcul de la distribution des champs en utilisant la formulation non linéaire en potentiel vecteur magnétique. La modélisation 3D peut être introduite pour inclure les effets tridimensionnels tels que l'influence des têtes de bobines et l'inclinaison de barres rotoriques [103], mais le choix d'un modèle 2D constitue un compromis satisfaisant entre le temps du calcul et la précision des résultats.

Le modèle par élément finis 2D appliqué à notre moteur asynchrone de référence montre que cette machine est relativement saturée, ce qui est représentatif des machines industrielles conçues dans l'esprit d'investissement initial minimal. La description géométrique, physique et ainsi électrique du moteur de référence modélisé sur Flux2D est présentée en détail dans l'Annexe B. L'exploitation des résultats en post-traitement du modèle numérique ainsi obtenu permet de déterminer les caractéristiques de fonctionnement du moteur au point nominal. Les pertes Joule sont estimées, les pertes fer rotoriques sont négligées et les pertes fer statoriques sont calculées a posteriori en utilisant le modèle de séparation des pertes de Bertotti [104].

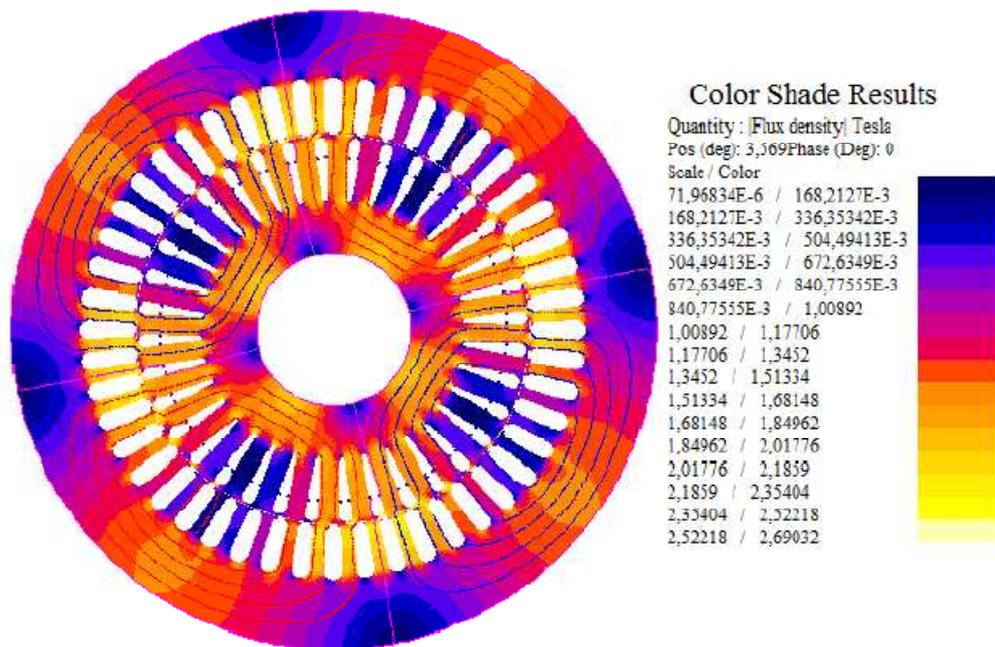


Figure 2-5. Ligne des champs magnétiques et densité de flux de la machine à partir de Flux2D

La valeur du glissement correspondant à un fonctionnement nominal en charge est a priori inconnue. Ce glissement nominal du moteur est déterminé en deux étapes (a) et (b).

- Une analyse paramétrée magnéto-harmonique est effectuée pour les valeurs du paramètre de glissement dans la gamme $g=3\%$ - 6% avec un pas $0,4\%$.
- Les quantités suivantes sont bien calculées d'une façon directe ou indirecte en post-traitement pour chaque valeur du paramètre g , sur la base des résultats de la simulation effectuée en (a).

- ✓ La puissance active P_1 ,
- ✓ La puissance réactive Q_1 ,
- ✓ Le couple électromagnétique C_e ,
- ✓ Les pertes fer p_{fer} ,
- ✓ Le courant absorbé $I_1 = (I_{ph1} + I_{ph2} + I_{ph3}) / 3$,
- ✓ Le facteur de puissance $\cos \varphi = (P_1 + p_{fer}) / \sqrt{(P_1 + p_{fer})^2 + Q_1^2}$,
- ✓ Les pertes Joule statoriques $p_{js} = 3 \cdot R_s \cdot I_1^2$,
- ✓ Les pertes Joule rotoriques $p_{jr} = g \cdot (P_1 - p_{js})$,
- ✓ Les pertes mécaniques estimées $p_{méc} \approx 0,005 \cdot P_n$,
- ✓ La puissance de sortie $P_2 = P_1 - p_{js} - p_{jr} - p_{méc}$,
- ✓ La vitesse du rotor $n = (1 - g) \cdot n_s$,
- ✓ Le couple utile $C_u = P_2 \cdot 60 / 2\pi \cdot n$
- ✓ Le rendement $\eta = P_2 / (P_1 + p_{fer})$,

Les caractéristiques de la machine de référence calculées a posteriori dans le logiciel d'éléments finis sont comparées à celles déterminées à partir du schéma équivalent obtenu précédemment par la modélisation analytique. La figure 2-6 et la figure 2-7 proposent respectivement le tracé du facteur de puissance et du rendement en fonction du glissement et le tracé de la caractéristique couple-glissement, qui sont obtenues par les deux méthodes.

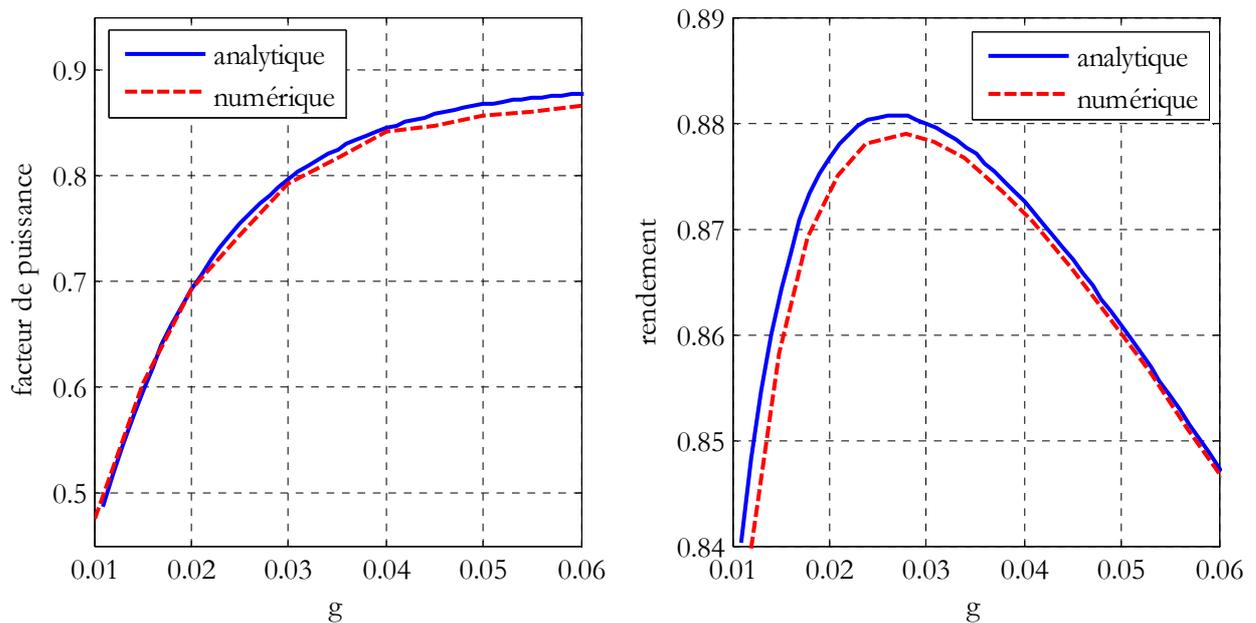


Figure 2-6. Facteur de puissance et rendement de la machine de référence au voisinage du point nominal, comparaison des calculs analytiques (trait continu) et des calculs par éléments finis (trait pointillé) sous une tension constante (400V/50Hz)

D'après les tracés du rendement et du facteur de puissance, on remarque que les résultats analytiques et numériques sont proches, particulièrement au voisinage du point nominal de fonctionnement de notre machine de référence. Un léger écart est constaté sur le tracé du rendement pour le régime de fonctionnement de 25 % jusqu'à 100 %; en effet, le modèle linéaire analytique sous-estime légèrement les pertes et plus précisément les pertes fer.

Le couple électromagnétique maximum et le couple de démarrage, obtenu par éléments finis, sont dégradés par rapport à ceux obtenus analytiquement (par rapport au cas linéaire non saturé). Ensuite, les résultats se convergent autour du point de fonctionnement nominal (localisé sur la figure 2-7).

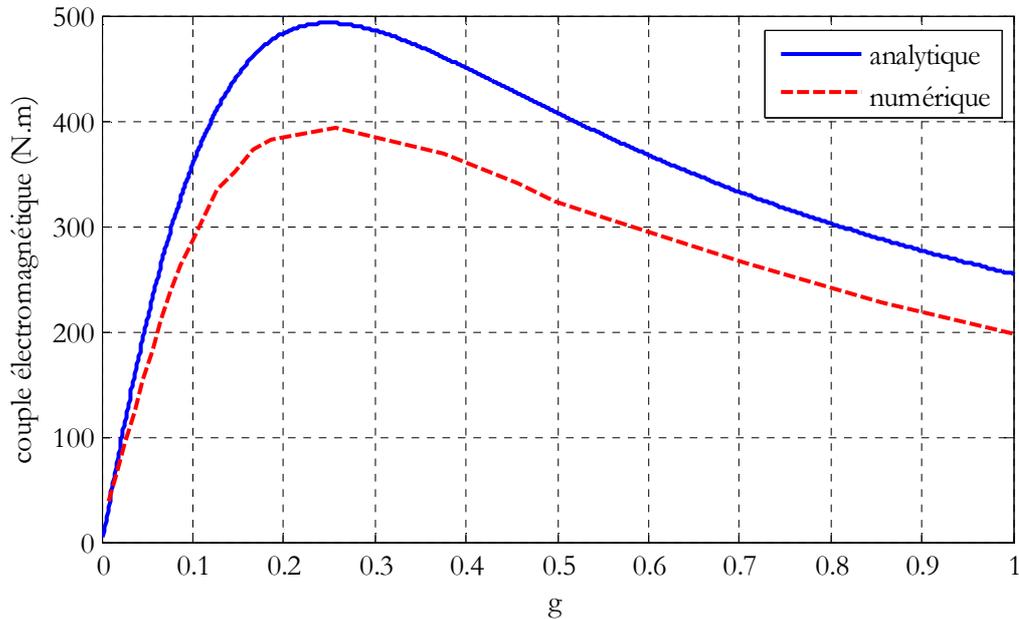


Figure 2-7. Caractéristiques couple – glissement de la machine de référence, comparaison des calculs analytiques (trait continu) et des calculs par éléments finis (trait pointillé) sous une tension constante (400V/50Hz)

Les effets de saturation locale expliquent en grande partie que le couple électromagnétique calculé par la technique des éléments finis soit plus faible que celui produit par le calcul analytique. D'autant que le phénomène de saturation contribue à amplifier les flux de fuites, c'est-à-dire la partie du flux magnétique produit par les bobines qui ne circule pas dans les pièces magnétiques du rotor

Lorsqu'il s'agit d'une estimation des pertes énergétiques de la machine en régime permanent au voisinage de point nominal, les résultats obtenus par le modèle analytique linéaire restent relativement acceptables pour notre machine de référence. Ces résultats sont légèrement transportables pour les machines de même gamme de puissance, contrairement aux grandes machines dont les fuites s'intensifient beaucoup plus.

iii. Robustesse des résultats

Le rendement en régime permanent du moteur électrique est basé principalement sur la détermination des paramètres du schéma équivalent monophasé. Certaines méthodes (soit analytique ou numérique), pour le calcul de ces paramètres, sont associées à une erreur de précision due à la démarche de calcul. Afin d'évaluer l'influence d'une variation, à titre d'exemple de $\pm 10\%$, d'un paramètre sur le calcul de rendement en régime nominal, on trace la variation de rendement en fonction de la variation de chaque paramètre, en supposant que cette légère variation d'un paramètre n'influe pas sur les autres.

On remarque, d'après la figure 2-8, que les réactances de fuites n'influent pratiquement pas sur le calcul du rendement ; la précision dans le calcul des fuites n'est donc pas obligatoire pour évaluer les pertes énergétiques. Ce n'est pas le cas pour les autres paramètres.

On peut conclure que, d'une part, une grande précision n'est pas requise dans le calcul analytique pour tous les paramètres du schéma équivalent, par exemple pour les réactances de fuites X_s , X'_r , pour les machines de même gamme de puissance que la machine de référence. D'autre part, on peut chiffrer l'erreur commise sur le

calcul de pertes énergétiques à partir des figure 2-9, figure 2-10 et figure 2-8, en fonction d'erreurs associées au calcul des autres paramètres.

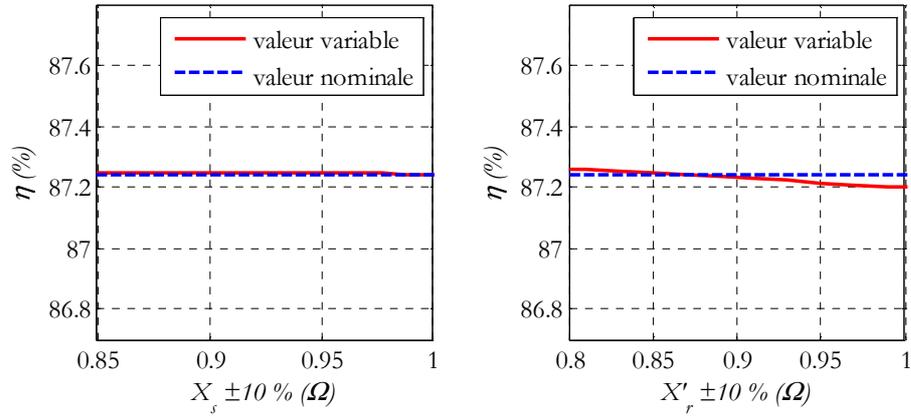


Figure 2-8. Influence des variations des réactances de fuites du schéma équivalent monophasé sur le rendement

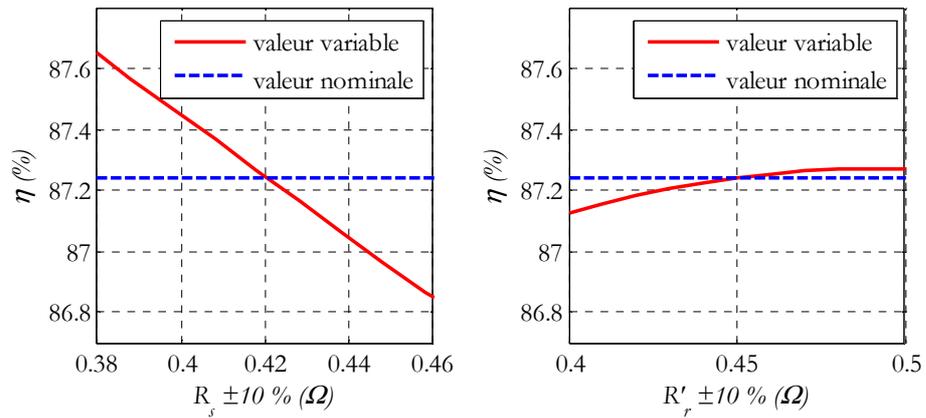


Figure 2-9. Influence des variations des résistances statorique et rotorique du schéma équivalent monophasé sur le rendement

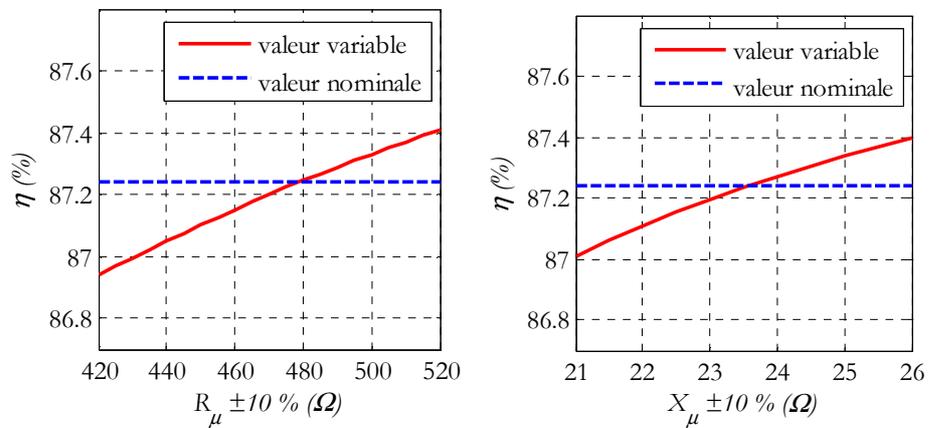


Figure 2-10. Influence des variations des paramètres caractérisant le circuit magnétique sur le rendement

A titre d'exemple, on trouve une erreur de 0,18 % sur le calcul du rendement si on a une erreur de +10 % sur la réactance magnétisante X_m . Le modèle analytique peut être ainsi utilisé pour recalculer via un outil informatique les paramètres d'une machine de la même gamme de puissance dont on connaît les données géométriques.

2.3.4. Calcul du rendement selon le type de service

Rappelons que les pertes dans une machine électrique tournante sont de cinq types [83], leurs pourcentages dépendent fortement du point de fonctionnement et de la gamme de puissance admise. Dans les machines de même gamme de puissance de celle de référence, les pertes dans le stator ($p_{js} = I_s^2 R_s$) représentent quelques 35 % des pertes totales et les pertes dans le rotor ($p_{jr} = I_r^2 R_r$) représentent environ 25 % des pertes totales. Les pertes dans le fer (p_{fer}) comprennent les pertes par hystérésis ainsi que les pertes par courants de Foucault dans le circuit magnétique du stator. Les pertes dans le fer représentent environ 25 % des pertes totales. Les pertes par frottements et ventilation ($p_{méc}$) comprennent les frottements dans les paliers, le frottement de l'air sur le rotor et la charge du ventilateur. Elles représentent environ 5 % des pertes totales. Les pertes supplémentaires en charge (p_{LL}) sont variables en fonction du carré du courant de charge et représentent au minimum 10 % des pertes totales.

La détermination de l'efficacité énergétique des machines asynchrones en service continu S1 est facilement réalisable à partir du schéma équivalent monophasé. Dans tous les autres services intermittents, un moteur a nécessairement une consommation énergétique et un comportement thermique différent de celui d'un service continu. Pour réaliser une ACV, les informations relatives au type de service doivent être les plus précises possibles étant donné que le rendement réel d'un même moteur peut varier du rendement nominal obtenu en service continu. Nous avons ci-après développé les impacts en termes d'énergie consommée, de pertes et donc de rendement lorsqu'un moteur est soumis à différents services.

i. Approche analytique

Dans cette étude, on considère le service intermittent cyclique à démarrage de type S4 comme référence pour le calcul énergétique car cela nécessite une modélisation plus complexe qui tient compte des pertes énergétiques lors du régime transitoire de démarrage. Il est à noter que l'étude est toujours valable pour d'autres types de services, par exemple, pour le service de type S3 si le nombre de démarrage par heure est faible ou pour le service de type S1 si le rapport cyclique devient grand.

La problématique liée au démarrage des machines électriques (couple de démarrage, courant d'appel, etc.) a été traité depuis longtemps dans la littérature [105-109]. Ainsi que l'optimisation des pertes énergétiques lié au démarrage via un contrôle électrique de machines (commande vectorielle, par logique floue, réseaux de neurones, etc.) [110-111]. Dans cette étude, on s'intéresse à la détermination du rendement de machines fonctionnant avec des cycles de démarrages non négligeables.

Une étude plus récente [112] a développé un programme sous Matlab/Simulink qui permet d'estimer l'énergie consommée par différents systèmes d'entraînement. Cette approche ne prend pas en considération certains types de pertes, telle que les pertes fer, les pertes mécaniques et les pertes supplémentaires en charge correspondant aux phénomènes liés aux flux de fuites dans les zones frontales [113]. Dans notre étude, une approche analytique basée sur le modèle vecteur espace [114-115] prend en compte ces pertes

Modèle vecteur espace - ce modèle a été développé pour commander les machines triphasée de façon précise, un peu comme l'étaient les machines à courant continu. C'est donc un problème d'automatique donc de petites variations autour d'un point de fonctionnement. C'est un modèle linéaire dans lequel toutes les inductances sont indépendantes de la valeur des courants. Avant de l'utiliser pour modéliser un démarrage il faut vérifier que, l'hypothèse fondamentale sur lequel il repose (la linéarité), est bien vérifiée.

Le nombre complexe $\underline{i}^s(t)$ est défini dans un plan complexe fixe dont l'axe réel est superposé à celui de la phase A de la machine, il s'exprime par l'expression habituelle suivante (Peter Vas, [115]) :

$$\underline{i}^s(t) = \frac{2}{3} \left\{ i_A^s(t) + e^{j\frac{2\pi}{3}} i_B^s(t) + \left(e^{j\frac{2\pi}{3}} \right)^2 i_C^s(t) \right\} \quad (2.10)$$

Pour illustrer cette approche, on peut considérer le régime permanent :

$$i_A^s(t) = I^s \sqrt{2} \cos(\omega t)$$

$$i_B^s(t) = I^s \sqrt{2} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$i_C^s(t) = I^s \sqrt{2} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Le développement de la relation de définition (2.10) montre que le nombre complexe $\underline{i}^s(t)$ a pour image un vecteur tournant d'amplitude $I^s \sqrt{2}$ dont la position à $t=0$ coïncide avec l'axe des réels donc l'axe de la phase A. cette relation de définition (2.10) est la même pour les flux totalisés $\underline{\psi}(t)$ et les tensions $\underline{v}(t)$.

En supposant que l'induction dans l'entrefer est à répartition spatiale sinusoidale, les six équations scalaires de la machine asynchrone à cage se réduisent à un système de deux équations en utilisant la formulation du vecteur espace représenté dans le repère fixe lié au stator. Le rotor à cage est représenté par le rotor bobiné triphasé équivalent.

$$\begin{cases} \underline{v}^s(t) = R_s \cdot \underline{i}^s(t) + \frac{d\underline{\psi}^s(t)}{dt} \\ 0 = R_r \cdot \underline{i}^r(t) + \frac{d\underline{\psi}^r(t)}{dt} - j\omega \underline{\psi}^r(t) \end{cases}$$

Les flux totalisés sont liés aux courants,

$$\begin{cases} \underline{\psi}^s(t) = L_s \cdot \underline{i}^s(t) + M_{sr} \cdot \underline{i}^r(t) \\ \underline{\psi}^r(t) = L_r \cdot \underline{i}^r(t) + M_{sr} \cdot \underline{i}^s(t) \end{cases}$$

Rappelons que ces expressions classiques mettent en œuvre les résistances statoriques et rotoriques R_s / R_r et les inductances cycliques propres L_s / L_r et mutuelles M_{sr} . Ces valeurs sont considérées constantes et égales à celles obtenues précédemment dans 2.3.3, page 45.

Lorsque la machine est connectée au réseau triphasé équilibré, à un instant donné défini par un angle α qui prend en compte l'instant de connexion par rapport à l'instant où la tension simple de la phase A passe par son maximum, le vecteur espace tension s'écrit : $\underline{v}^s(t) = V^s \sqrt{2} e^{j(\omega t + \alpha)}$. La théorie du vecteur espace permet de calculer le couple électromagnétique instantané : $C_e(t) = p M_{sr} \cdot \underline{i}^s(t) \cdot \underline{i}^r(t)$. Dans ces conditions la vitesse de l'arbre est donnée par l'équation mécanique :

$$C_e = J \frac{d\Omega}{dt} + C_c + c_p \quad (2.11)$$

Où C_e est le couple électromagnétique, C_c est le couple de charge et c_p est le couple de pertes mécaniques. Ω est la vitesse rotorique et J est le moment d'inertie rapporté à l'arbre de la machine.

Les équations des tensions et des flux totalisés ainsi que l'équation mécanique ont été implantées sur un calculateur en utilisant un environnement de calcul complexe (Matlab 'script') en appliquant la méthode d'Euler. Le pas de calcul utilisé pour le calcul numérique doit être petit devant les constantes de temps les plus petites de la machine qui sont liées aux inductances de fuites. Il est fixé à 50 μ s.

Les comportements énergétiques de la machine sont ainsi calculés à partir des variables d'état qui sont déterminées selon l'algorithme de calcul, schématisé à la figure 2-11.

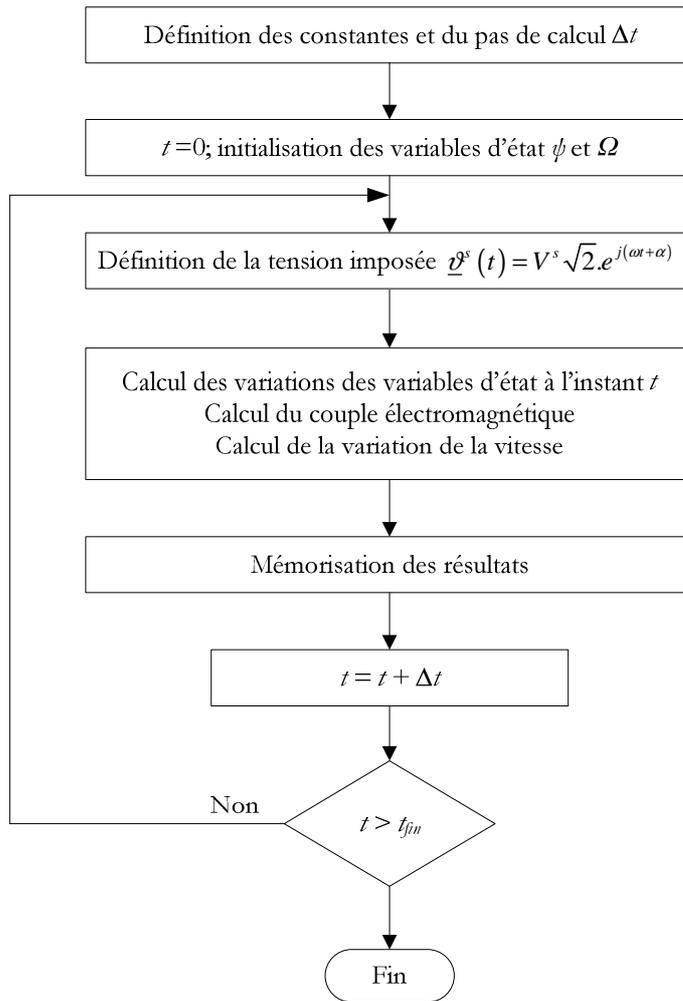


Figure 2-11. Algorithme de résolution du modèle linéaire

Pour vérifier la principale hypothèse du modèle, la linéarité, il est possible de vérifier que les flux correspondent à des inductions d'entrefer situées dans la zone linéaire de la caractéristique B (H). En effet le modèle utilise la notion d'inductance qui suppose la proportionnalité entre le flux et le courant donc un fonctionnement dans la partie linéaire de la courbe B (H) à tout instant du régime transitoire de démarrage.

Pour cela, on présente à partir du modèle linéaire à la figure 2-12, en (a), le courant de la phase A du stator, en (b), la vitesse de l'arbre rotorique et à la Figure 2-13 les flux totalisés embrassés par la même phase de la machine de référence à vide. Ces figures montrent que pendant la phase de démarrage, les courants sont très élevés alors que les flux totalisés sont inférieurs à ceux du régime permanent. Il est également possible d'obtenir le flux par l'intégration sur un pas polaire de l'expression de l'induction d'entrefer $b_\delta = B_\delta \cdot \cos(\omega t - \lambda^s)$, comme l'indique l'équation (2.12).

$$\psi_A^s(t) = \frac{n_s}{2} \cdot d_{is} \cdot L_a \cdot \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} B_\delta \cdot \cos(\omega t - \lambda^s) \cdot d\lambda^s \quad (2.12)$$

Où, $n_e^s = 46$ est le nombre de spires embrassées par le flux sous un pôle statorique, $d_{is} = 0,122$ m et $L_a = 0,179$ m sont respectivement le diamètre d'alésage et la longueur du circuit magnétique, B_δ est la valeur crête de l'induction d'entrefer et enfin λ^s est la position polaire d'un point quelconque de l'entrefer.

L'induction crête s'exprime donc par :

$$B_\delta = \frac{\hat{\psi}_A^s}{n_e^s \cdot d_{is} \cdot L_a} \quad (2.13)$$

On obtient, donc, une valeur d'induction crête d'entrefer correspondant aux flux estimés par le modèle linéaire d'ordre 1 T ; cette valeur n'a pas dépassé la valeur d'induction de saturation calculée auparavant par le modèle d'éléments finis (1 T). Ce qui permet de valider l'utilisation du modèle linéaire afin de modéliser notre machine.

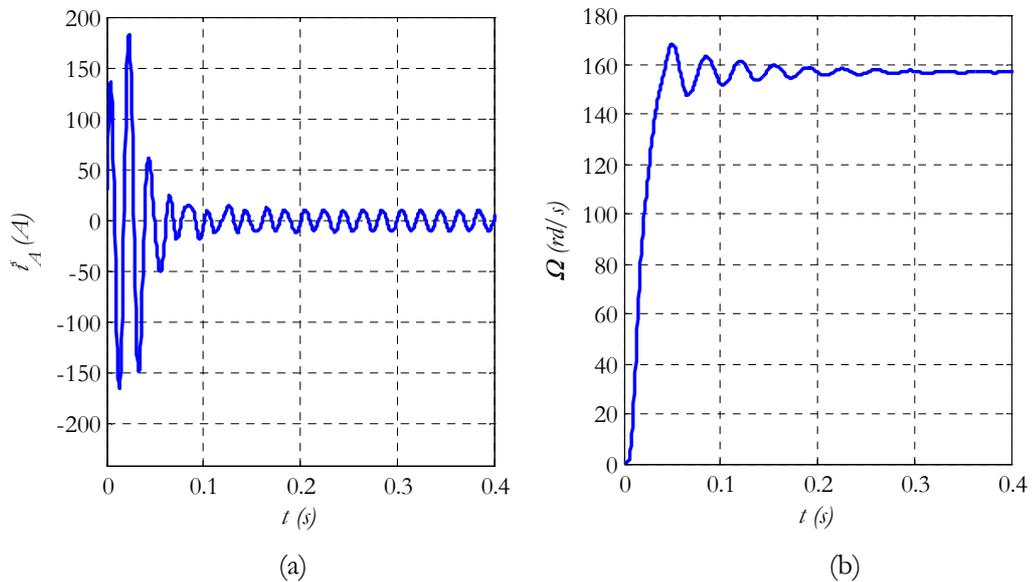


Figure 2-12. Courant de la phase A du stator (a) et vitesse de l'arbre rotorique (b), sous une tension d'amplitude constante à fréquence fixe (400V/50Hz) et un moment d'inertie $J_0=0,031 \text{ kg.m}^2$

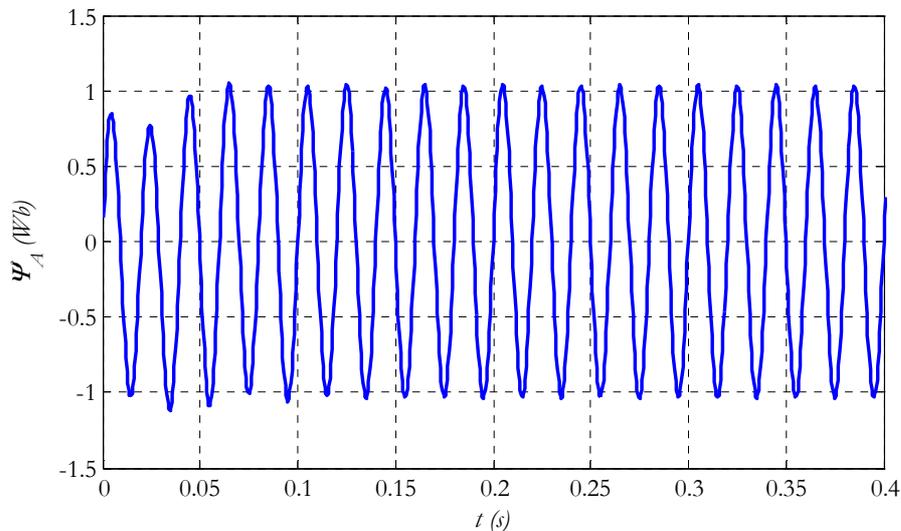


Figure 2-13. Flux totalisés embrassés par la phase A du stator, sous une tension d'amplitude constante à fréquence fixe (400V/50Hz) et un moment d'inertie $J_0=0,031 \text{ kg.m}^2$

Bilan d'énergie - L'énergie consommée E_a par le moteur durant un cycle de fonctionnement de durée T_c est exprimée par l'équation (2.14) :

$$E_a = \frac{3}{2} \int_0^{T_c} [\underline{\psi}^s(t) \cdot \underline{i}^s(t)] \cdot dt \quad (2.14)$$

Le développement mathématique de l'équation (2.14), en introduisant les formules des tensions et des flux totalisés, permet de déterminer l'expression (2.15) de l'énergie absorbée durant un cycle de fonctionnement en tenant compte de la phase de démarrage.

$$E_a = E_m + E_J + E_{mec} \quad (2.15)$$

E_m est l'énergie magnétique stockée dans le circuit magnétique de la machine, cette valeur est nulle si T_c correspond à un nombre entier de périodes d'alimentation. Pour un fonctionnement classique avec un grand nombre de cycles non synchronisés sur la période du réseau, cette grandeur est statiquement nulle. E_J représente l'énergie perdue par effet Joule et E_{mec} est l'énergie mécanique transmise à l'arbre. Avec:

$$E_J = \int_0^{T_c} p_J \cdot dt = \frac{3}{2} \int_0^{T_c} \left(R_s \cdot (\underline{i}^s)^2 + R_r \cdot (\underline{i}^r)^2 \right) \cdot dt \quad (2.16)$$

L'énergie transformée au niveau de l'arbre du rotor s'exprime comme suit,

$$E_{mec} = \int_0^{T_c} P_{mec} \cdot dt = \frac{3}{2} \int_0^{T_c} \left(-\omega \cdot \frac{(\underline{\psi}^r)^2}{L_r} + \omega \frac{M_{sr}}{L_r} \underline{\psi}^r \cdot \underline{i}^s \right) \cdot dt \quad (2.17)$$

L'énergie utile E_u est déduite par l'introduction de l'énergie perdue par ventilation et frottement,

$$E_u = E_{mec} - \int_0^{T_c} (c_p \cdot \Omega) \cdot dt \quad (2.18)$$

Avec,

$$c_p = c_0 + f_g \cdot \Omega + f' \cdot \Omega^2 \quad (2.19)$$

c_0 , f_g et f' représente respectivement le couple de frottement sec, le coefficient de frottement visqueux et le coefficient de frottement aérodynamique.

Limite du modèle - Le modèle vecteur espace ignore l'énergie perdue liée aux pertes fer p_{fer} et aux pertes supplémentaires en charge p_{LL} . Grace à la linéarité du modèle, on propose de superposer d'autres modèles de calcul et d'ajouter ces pertes.

Les pertes le fer dans les machines électriques peuvent être représentées par plusieurs modèles. Ces modèles sont différents selon nombreux aspects et sont destinés à différents objectifs [116].

Concernant les pertes supplémentaires en charge, il existe diverses théories et normes qui permettent de calculer et/ou mesurer ce type de pertes. Elles sont bien documentées également dans les publications de Dreyfus [117]. Une série de normes de tests de la machine électrique existent, par exemple la norme IEEE 112 (USA), JEC 37 (Japon) et CEI 60034-2 (Europe).

Pertes fer - Les modèles basés sur les équations de Steinmetz [118] et les modèles de séparation de pertes (Jordanie [119] et Bertotti [104]) sont préférables et mieux adaptés pour la détermination approximative et rapide

de pertes de fer. Ils séparent la formule de p_{fer} en trois termes selon l'équation (2.20), les pertes par hystérésis statique p_{hyst} , les pertes par courants de Foucault p_{CF} et les pertes par excès p_{exc} .

$$\begin{aligned} P_{Fe} &= P_{hyst} + P_{CF} + P_{exc} \\ P_{Fe} &= C_{hyst} \cdot f \cdot \widehat{B}^2 + C_{CF} \cdot f^2 \cdot \widehat{B}^2 + C_{exc} \cdot f^{1.5} \cdot \widehat{B}^{1.5} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Cependant, ce modèle reste simplement une approximation valable pour un cas avec champ magnétique unidirectionnel et uniforme. D'autres modèles plus adaptés au champ tournant existent déjà, ils introduisent un facteur de pertes rotationnel dû au champ tournant sur le modèle de séparation de pertes de Bertotti [120].

Bien que plus restreint, le modèle établi dans l'équation (2.20) peut être identifié simplement à l'aide de quelques caractéristiques de tôles électriques. De plus, il est facilement intégrable dans notre modèle du vecteur espace, où la densité de flux $B(t)$ est déterminée à partir de tension statorique $v^s(t)$. Ce modèle est donc retenu pour calculer à la fois les pertes fer statoriques et les pertes fer rotoriques au cours du régime transitoire de démarrage ou la fréquence rotorique (g,f) n'est pas encore négligeable.

Pertes supplémentaires en charge - Ces pertes sont les éléments dont les origines sont les moins connues dans le bilan énergétique de la machine électrique. A partir des études bibliographiques, on peut conclure qu'il existe des pertes supplémentaires dans le cuivre et dans le fer. Les pertes supplémentaires dans le cuivre résultent de l'effet pelliculaire sur l'enroulement rotorique. En effet, des courants dont la fréquence est différente de celle du glissement naissent dans la cage du moteur et engendrent ces pertes. Les pertes supplémentaires dans le fer comprennent les pertes par pulsation du flux et les pertes superficielles. Les premières sont provoquées par l'effet de la variation de la position des encoches statoriques et rotoriques et les secondes sont dues à l'influence des encoches sur la courbe d'induction dans l'entrefer et à la variation du flux dans les dents.

La norme CEI 60034-2-1 avance deux méthodes d'évaluation de ce type de pertes. La première méthode est adaptée à la machine qui fonctionne en régime permanent continu où les pertes sont considérées constantes et calculées comme un pourcentage de la puissance d'entrée. Pour notre machine de référence qui peut être considérée comme représentative de la gamme de puissance moyenne, les pertes p_{LL} seraient, ainsi exprimées selon l'équation (2.21) en régime permanent. Avec P_1 et P_2 sont respectivement la puissance d'entrée et la puissance de sortie de la machine électrique.

$$p_{LL} = P_1 \cdot \left[0,025 - 0,005 \cdot \log \left(\frac{P_2}{1 \text{ kW}} \right) \right] \quad (2.21)$$

La deuxième méthode proposée est adaptée au fonctionnement de la machine au-dehors du régime permanent, ce qui sera notre cas. Les pertes p_{LL} sont variables et calculées comme la différence du carré de courant de charge et du carré de courant à vide, comme le montre l'équation (2.22)

$$p_{LL} = a \cdot [I^2(t) - I_0^2] \quad (2.22)$$

Où a est un coefficient qui s'exprime selon la CEI 60034-2-1 en fonction des pertes en charge et du couple de la machine. L'équation (2.22) identifiée à l'équation (2.21) au point nominal permet de déduire a qui vaut 0,8 pour le cas de notre machine de référence.

Bilan d'énergie global – Après intégration des pertes fer p_{fer} et des pertes supplémentaires en charge p_{LL} dans le bilan d'énergie dérivé du modèle de vecteur espace, l'énergie active totale consommée par la machine de référence E_t durant un cycle de fonctionnement intermittent de durée T_t est exprimée par l'équation (2.23) qui remplace l'équation (2.14).

$$E_1 = \frac{3}{2} \int_0^{T_c} [\underline{\vartheta}^s(t) \cdot \underline{i}^s(t)] dt + \int_0^{T_c} p_{fer} dt + \int_0^{T_c} p_{LL} dt \quad (2.23)$$

L'énergie perdue totale de la machine E_p pendant un cycle est exprimée par l'équation (2.24) :

$$E_p = \int_0^{T_c} p_J dt + \int_0^{T_c} (c_p \cdot \Omega) dt + \int_0^{T_c} p_{fer} dt + \int_0^{T_c} p_{LL} dt \quad (2.24)$$

Il est aussi possible de prendre en compte l'énergie stockée E_c dans l'inertie dans le bilan d'énergie global pour un temps de fonctionnement donnée incluant l'état transitoire. E_c est exprimée avec l'expression (2.25).

$$E_c = \int_{t_1}^{t_2} (C_c \cdot \Omega) dt \quad (2.25)$$

Rappelons que C_c est le couple de charge, t_1 et t_2 représentent respectivement l'instant où l'alimentation est coupée et l'instant où l'arbre s'immobilise. L'énergie utile E_2 de la machine est donc déduite par l'équation (2.26).

$$E_2 = E_1 - E_p + E_c \quad (2.26)$$

L'efficacité énergétique de la machine pour un fonctionnement intermittent durant un cycle de fonctionnement de durée T_c est définie comme étant le rapport entre l'énergie utile et l'énergie consommée totale.

$$\eta = \frac{E_2}{E_1} \quad (2.27)$$

ii. Expérimentation et validation

La validation de cette approche analytique basée sur le modèle du vecteur espace est effectuée sur un banc d'essais disponible au laboratoire.

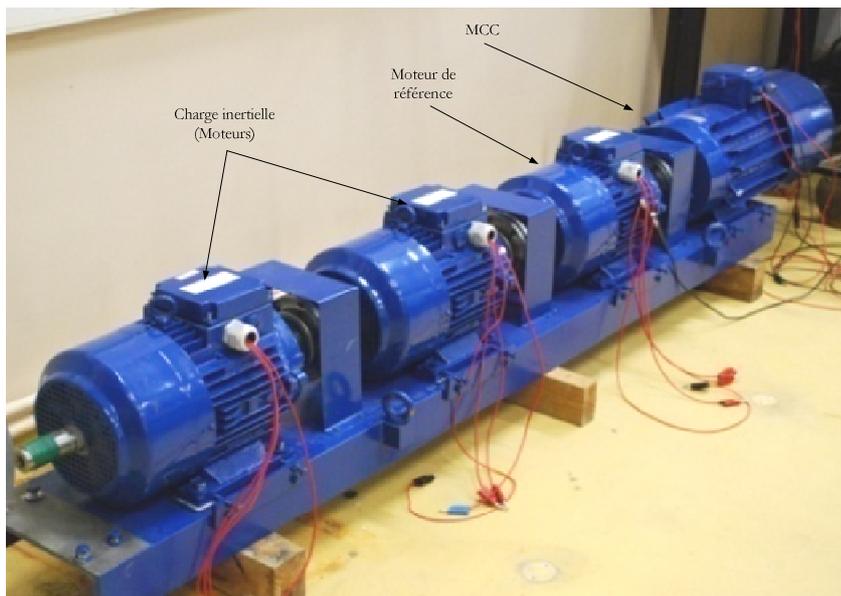


Figure 2-14. Banc de test expérimental, moteurs asynchrones accouplés avec la MCC

Le banc est équipé de la machine expérimentale de référence à 4 pôles, alimentée directement sur le réseau. Ses valeurs nominales sont 10 kW – 400 V – 50 Hz – 21 A – 1440 tr/min – $\cos\varphi=0,81$. La machine est couplée à une charge inertielle J à travers les inerties totales du banc de test et à une génératrice à courant continu (MCC) de 22 kW débitant sur charge résistive. La figure 2-14 montre le banc de test utilisé qui comprend le moteur de référence, les deux moteurs ne servant qu'à ajouter de l'inertie et la MCC.

Les pertes mécaniques liées à la charge inertielle additionnelle sont prises en compte dans le modèle théorique à partir du couple de pertes c_p . En pratique, il est difficile de séparer les pertes mécaniques de la machine des pertes mécaniques du banc sans utiliser des capteurs de couples placés sur l'arbre. Dans ce test les pertes mécaniques du banc sont donc intégrées dans le calcul du rendement du moteur qui s'éloigne donc du rendement nominal de sa plaque signalétique.

Mesures et acquisition des données – Afin d'exploiter facilement le banc d'essais, l'ensemble des moteurs accouplés au moteur de référence est modélisé par une inertie totale J et un couple de pertes $c_p = (c_0 + f_s \Omega + f \cdot \text{sign}(\Omega) \cdot \Omega^2)$ qui seront identifiés plus tard. Un essai de ralentissement a été effectué pendant que la MCC était excitée à vide. Le couple de pertes c_p inclut donc également les pertes fer de la MCC. Un schéma synoptique du banc d'essais est représenté sur la figure 2-15.

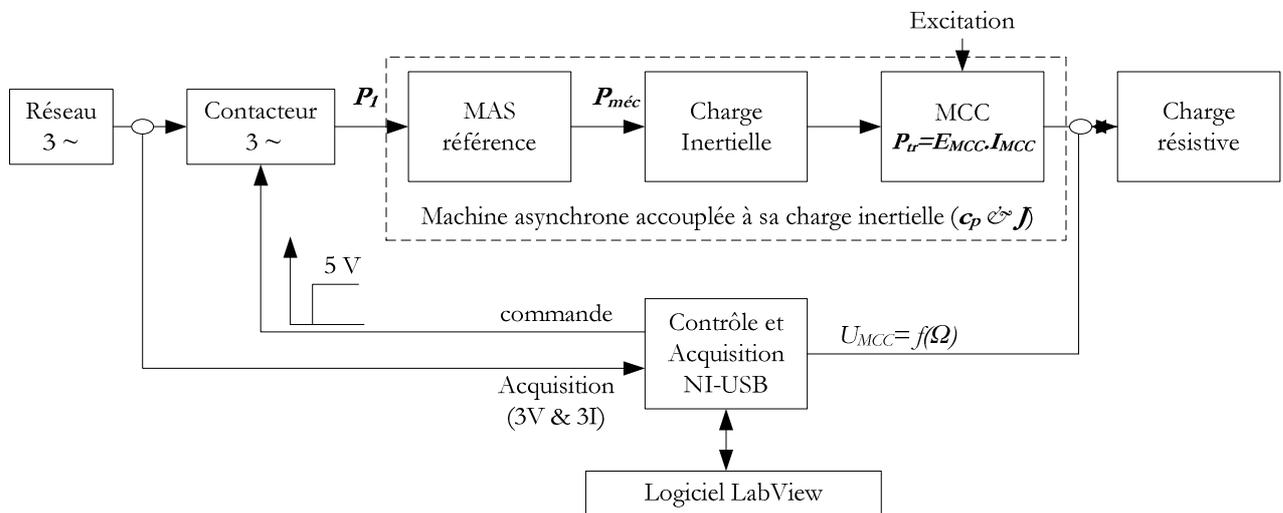


Figure 2-15. Schéma synoptique du banc d'essais

D'après cette figure, l'efficacité énergétique de la machine de référence accouplée à sa charge inertielle sur le banc d'essais est calculée selon l'équation (2.28). Les pertes dans l'inducteur de la MCC ne sont pas comptabilisées, elles sont hors de la chaîne expérimentale, les pertes fer dans son rotor augmentent un peu les coefficients définissant les pertes mécaniques qui ont été relevés pendant que la MCC est excitée.

$$\eta = \frac{\int_0^{t_c} P_{tr} dt}{\int_0^{t_c} P_1 dt} \quad (2.28)$$

Dans cette expression, $P_{tr} = E_{MCC} \cdot I_{MCC}$ est la puissance transmise dans l'entrefer de la MCC ; elle peut être exprimée, en fonction de la résistance de la charge résistive R_{ch} et de la résistance de l'induit de la MCC r_i par l'équation (2.29) :

$$P_{tr} = \left(1 + \frac{r_i}{R_{ch}} \right) \frac{U_{MCC}^2}{R_{ch}} \quad (2.29)$$

En pratique, la mesure de l'efficacité de la machine de référence montée sur le banc d'essais nécessite seulement, d'après l'équation (2.28), la mesure de puissance instantanée d'entrée $P_1(t)$ (donc la mesure de 3 tensions et 3 courants des phases statoriques de la machine) et la mesure de la vitesse instantanée de rotation $\Omega(t)$. En connaissant la résistance de la charge, la vitesse a été mesurée par l'intermédiaire de la tension délivrée par la MCC vu l'indisponibilité du matériel adéquat. En charge, l'influence de la légère diminution de l'excitation de la MCC sur la mesure de la vitesse est supposée négligeable car la puissance de la MCC entraînée (22 kW) est largement supérieure à celle du moteur de référence (10 kW). Donc la réaction de l'induit joue très peu.

La mesure des tensions et des courants est effectuée à l'aide de sondes de courants et de tensions industrielles qui garantissent une bonne précision de mesure de 1 % sur la lecture et 0,1 % sur le calibre. Ces sondes présentent, d'après le constructeur de bonne sensibilité de sortie. Le système d'acquisition doit être capable d'acquérir sept signaux et de générer un signal de commande du contacteur de puissance de Marche/Arrêt de la machine qui est alimentée par le réseau 400V/50Hz à instant connu. L'acquisition des données est réalisée à l'aide d'un module NI-USB 6008 de "National Instruments". Il est codé en 12-Bit avec 10 kS/s. Ce matériel était utilisé avec LabView comme un logiciel d'interface afin d'acquérir, d'analyser et de stocker les mesures. Le programme réalisé sous LabView est illustré dans la figure 2-16.

Ce programme comprend trois blocs séquentiels. Le premier sert pour la détection du passage par zéro de la tension d'une phase du réseau et la synchronisation avec le démarrage du moteur. Le deuxième bloc sert à envoyer le signal d'excitation (0 volts-5 volts) à la bobine du contacteur de puissance et en parallèle à acquérir les signaux d'entrées avant de les enregistrer dans un fichier texte. Le troisième bloc permet de faire un temps de repos pour la machine. Tous les trois blocs sont placés dans une boucle 'for' pour répéter le cycle autant de fois que nécessaire.

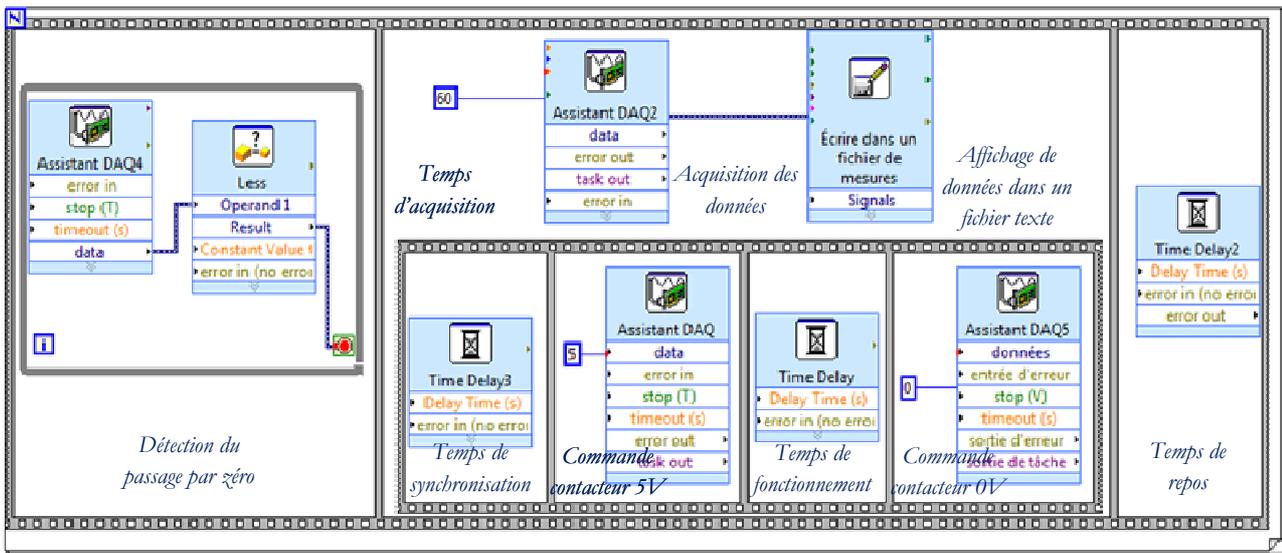


Figure 2-16. Synoptique de programme d'acquisition des mesures sous LabView

Identification des paramètres mécaniques du banc expérimental– Les premiers tests permettent l'identification des paramètres mécaniques du banc de test (le moment d'inertie global J et les divers coefficients de pertes mécaniques f_g , f' et c_0). Ces paramètres figurent dans l'équation mécanique (2.30) de la machine électrique. Rappelons que c_0 représente le couple de frottement sec, f_g est le coefficient de frottement visqueux et f' est le coefficient de frottement aérodynamique.

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_c - (c_0 + f_g \cdot \Omega + f' \cdot \Omega^2) \tag{2.30}$$

Pour déterminer ces paramètres, deux essais ont été réalisés ; un essai à vide (cf. Tableau 2-3) et un essai de ralentissement de la vitesse rotorique qui est l'image de la f.é.m. induite aux bornes de l'inducteur de la génératrice à courant continu (cf. figure 2-17).

Tableau 2-3. Résultat d'essai à vide sur le banc de tests

U_0	I_0	P_0	Ω_0
386 V	9,7 A	1150 W	154,4 rd/s

L'essai à vide permet d'obtenir une première équation (2.31), sachant que C_{e0} est le couple électromagnétique à vide de la machine de référence. L'essai de ralentissement donne une deuxième équation (2.32) où le couple électromagnétique C_e et le couple de charge C_c sont nuls; l'identification de cette équation à la courbe associée en trois instants différents, qui sont définis par les points A, B et C sur la courbe de la figure 2-17, permet d'avoir trois équations différentes. Ces points correspondent respectivement à l'instant initial où la vitesse est nominale, à l'instant où la vitesse est faible et à l'instant où la vitesse est quasi nulle.

$$C_{e0} = (c_0 + f_g \cdot \Omega_0 + f' \cdot \Omega_0^2) \quad (2.31)$$

$$0 = J \frac{d\Omega}{dt} + (c_0 + f_g \cdot \Omega + f' \cdot \Omega^2) \quad (2.32)$$

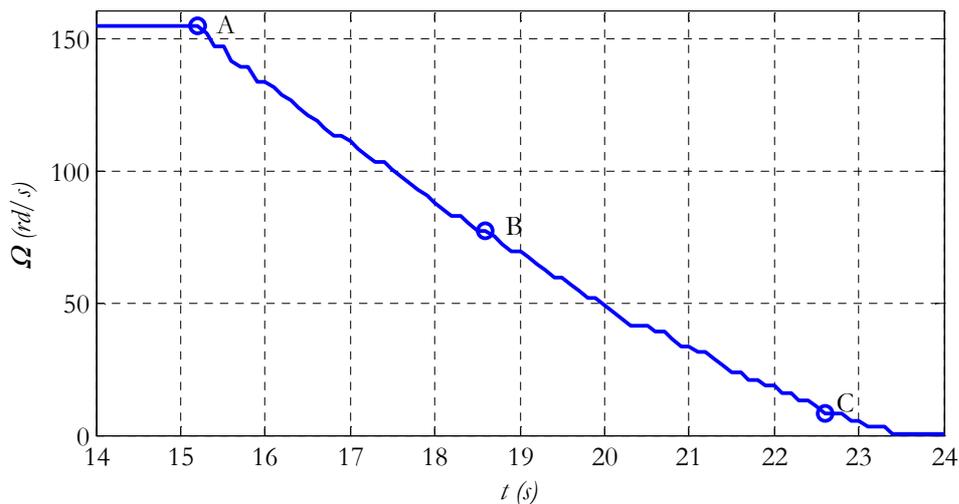


Figure 2-17. Relevé temporel de la vitesse de l'arbre

Au final, on dispose d'un système de quatre équations et de quatre inconnues. Le résultat de la résolution de ce système d'équations est présenté dans le Tableau 2-4. Le couple de pertes correspond aux pertes mécaniques qui divisent la vitesse à vide. Ce type de perte mécanique a été mesurée expérimentalement sur le banc par la méthode classique à tension variable (décrite déjà dans la norme CEI 60034-2-1). Le résultat d'identification du couple de pertes, obtenu dans le Tableau 2-4, a bien été vérifié en multipliant ce couple de pertes identifié par la vitesse à vide mesurée.

Tableau 2-4. Paramètres mécaniques du banc de tests

J	f_g	f'	c_0	c_p
0,17	0,048	$0,17 \times 10^{-3}$	0,99	4,35
[kg.m ²]	[N.m/rd.s ⁻¹]	[Nm/(rd.s ⁻¹) ²]	[N.m]	[N.m]

Comparaison des résultats expérimentaux et théoriques – Le service intermittent cyclique périodique à démarrage S4 est le service qui a été considéré afin de valider l’approche théorique, vu que les comportements énergétiques de la machine lors de ce type de service sont différents de ceux du service continu S1. Ce type de service est défini par le facteur de marche F (%), le nombre de démarrages par heure (\hat{c}) et l’inertie totale montée sur l’arbre. Soit le service S4 : (25%), ($\hat{c}=60$), ($0,17 \text{ kg.m}^2$). Les résultats expérimentaux et théoriques sont comparés au niveau des courants absorbés et des puissances d’entrée et de sortie de la machine associée à sa charge inertielle pour un cycle de fonctionnement de durée $T_c=60 \text{ sec}$.

La figure 2-18 et la figure 2-19 en (a) et (b) comparent pour chaque grandeur les résultats théoriques et expérimentaux. Ces figures montrent que la concordance entre les courbes théoriques issues du modèle et les relevés expérimentaux, convergent suffisamment pour estimer précisément le rendement en service intermittent avec un transitoire de démarrage. Ce dernier reste cependant faible car la charge inertielle sur le banc est relativement petite ($0,17 \text{ kg.m}^2$). Sur la figure 2-19 (a), on constate qu’il y a une perte énergétique importante sur la phase de démarrage, laquelle reste non négligeable, même avec une durée faible, lorsqu’on considère un nombre important de démarrages durant ce type de service.

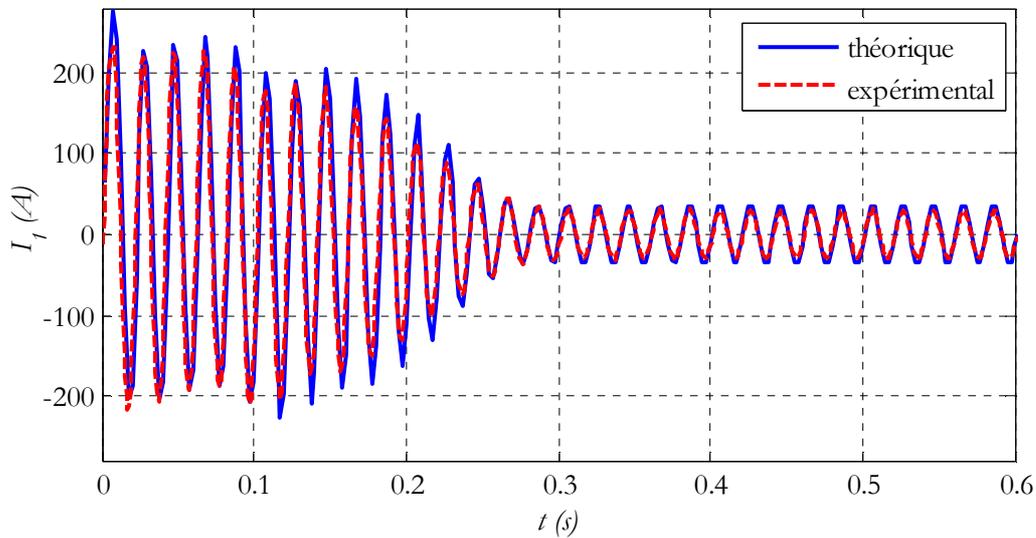


Figure 2-18. Courants théorique et expérimental d’une phase statorique

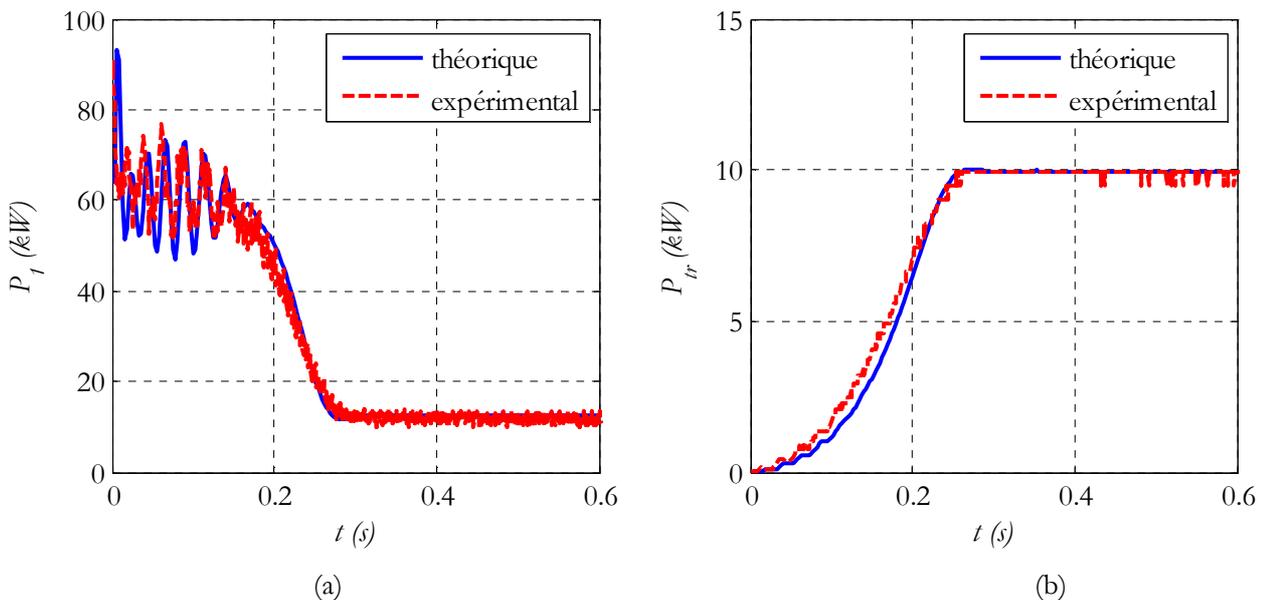


Figure 2-19. Puissances instantanées de la machine accouplée à sa charge inertielle, (a) puissance d’entrée de la machine de référence et (b) la puissance transmise à l’entrefer de la MCC

Le niveau mécanique de la chaîne expérimentale s'arrête au niveau de l'entrefer de la MCC car il y a les pertes fer de la MCC à comptabiliser. L'enregistrement des puissances instantanées durant le service intermittent avec démarrages permet de calculer l'efficacité énergétique de la machine en termes d'énergie comme étant le rapport entre l'intégrale de la puissance transmise à l'entrefer de la MCC et la puissance d'entrée durant un cycle de fonctionnement T_c , en appliquant l'équation (2.33). Le rendement de la machine en régime nominal peut être aussi déterminé ici en considérant juste le rapport entre les deux puissances, à un instant donné en-dehors de la phase transitoire.

$$\eta = \frac{\int_0^{T_c} P_{tr} dt}{\int_0^{T_c} P_1 dt} \quad (2.33)$$

Le Tableau 2-5 compare les valeurs du rendement obtenues à partir de l'approche théorique considérée et les mesures expérimentales réalisées pour notre machine expérimentale de 10 kW fonctionnant soit en service continu soit en service intermittent à démarrage. Le modèle théorique est donc validé pour deux types de service : S1 et S4 [$F=25\%$, $c=60$ (i.e. $T_c=60$ s), $J=0.17$ kg.m²] sur notre banc expérimental.

Tableau 2-5. Rendement énergétique théorique et expérimental en % de la machine de référence accouplée à sa charge inertielle

Service continu F=100 %		Service intermittent F=25%, c=60, J=0,17 kg.m ²	
Théorique	Expérimental	Théorique	Expérimental
81,9	81,6	80,01	80,1

Les résultats expérimentaux et théoriques sont proches, l'approche basée sur le vecteur espace intégrant un modèle simple représentant les pertes fer et un autre modèle qui intègre les pertes supplémentaires en charge permet d'estimer l'efficacité énergétique réelle d'une machine pour n'importe quel type de service, continu ou intermittent. Il est à noter qu'en service continu, le rendement représente le rapport entre la puissance de sortie de la chaîne P_{tr} et la puissance absorbée P_1 dans un point de fonctionnement en régime permanent (hors de régime transitoire de démarrages). Tant qu'en service intermittent, le rendement est le rapport entre l'énergie transmise et l'énergie consommée à l'entrée. Ces quantités d'énergie sont calculées en intégrant les puissances données sur la figure 2-19 sur l'intervalle de temps de durée T_c . Cela explique le fait qu'il y a moins d'écart en service intermittent qu'en service continu, entre les résultats expérimentaux et théoriques car la différence globale se diminue sur un intervalle de temps de durée T_c . Le modèle sera étendu pour analyser d'autres cas avec des inerties différentes afin d'évaluer finement la phase d'usage de la machine selon les divers paramètres de son service.

iii. Exploitation : rendement de la machine selon les paramètres de service

Ce modèle théorique développé permet de prédire les comportements énergétiques de la machine, on l'utilise dans la suite de ce chapitre pour prédéterminer le rendement de la machine de référence selon son type de service. En effet, le rendement en service intermittent S4 dépend fortement du facteur de marche $F(\%)$, du nombre de démarrages / heure (c) et de l'inertie totale reportée sur l'arbre (J). La figure 2-20 affiche le rendement de la machine de référence 10 kW fonctionnant en service S1 et S4 ($F=5\%$) en fonction du temps du cycle T_c (c.-à-d. nombre de démarrages / heure $c=3600/T_c$) et selon diverses charges inertielles. La figure 2-21 et la figure 2-22 affichent la même chose pour un facteur de charge respectivement de $F=25\%$ et de $F=60\%$. Dans les figures, J_0 représente l'inertie de la machine de référence seule. Rappelons que toutes ces figures sont obtenues par l'application du modèle vecteur d'espace étendu aux pertes fer et pertes supplémentaires en charge.

On constate, d'après ces figures, que le rendement du moteur en service S4 peut diverger considérablement du rendement en cas de service S1 si le nombre de démarrages (φ) ou la charge inertielle J sur l'arbre augmente. Le temps de démarrage dépend de la valeur de l'inertie ramenée sur l'arbre de la machine.

Les moteurs à vide et ceux qui présentent les plus faibles moments d'inerties, comme les embrayages, atteignent leur vitesse maximale très facilement. Les temps de démarrage ne sont très longs qu'en cas d'accélération de masses importantes. On parle dans ce cas de démarrage lourd comme, par exemple, dans les centrifugeuses, les broyeurs à boules, les systèmes de transport et les grands ventilateurs. Le rendement des machines électriques utilisées dans ces applications diminue. Le facteur de marche F est un paramètre important dans le calcul du rendement ; on remarque que l'efficacité énergétique en service S4 s'approche de celle en service S1 lorsque F augmente.

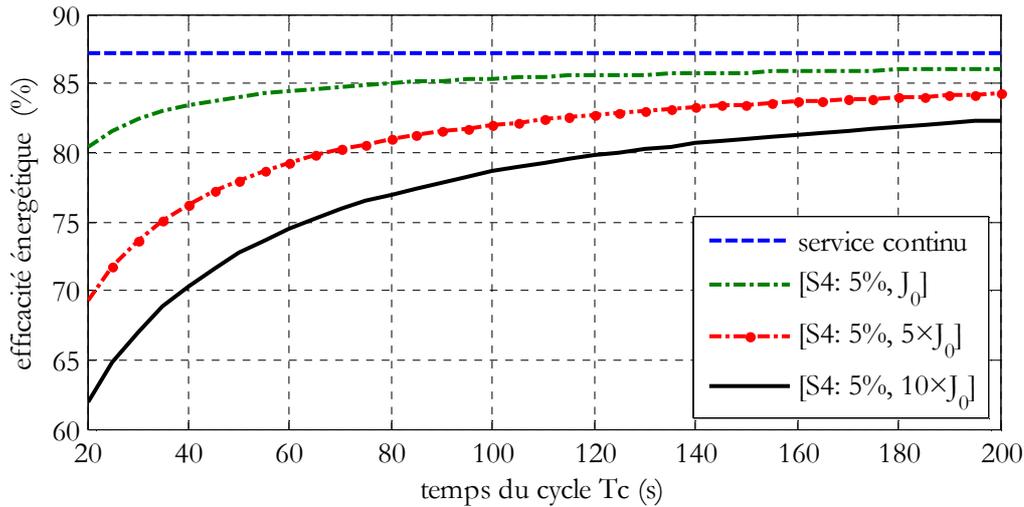


Figure 2-20. Rendement de la machine de référence en fonction de temps du cycle, pour un facteur de marche $F=5\%$

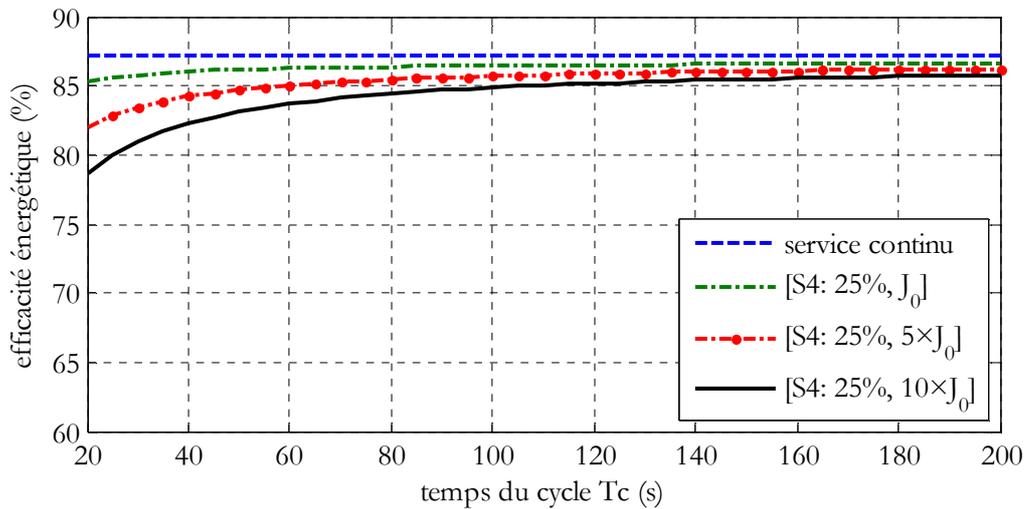


Figure 2-21. Rendement de la machine de référence en fonction de temps du cycle, pour un facteur de marche $F=25\%$

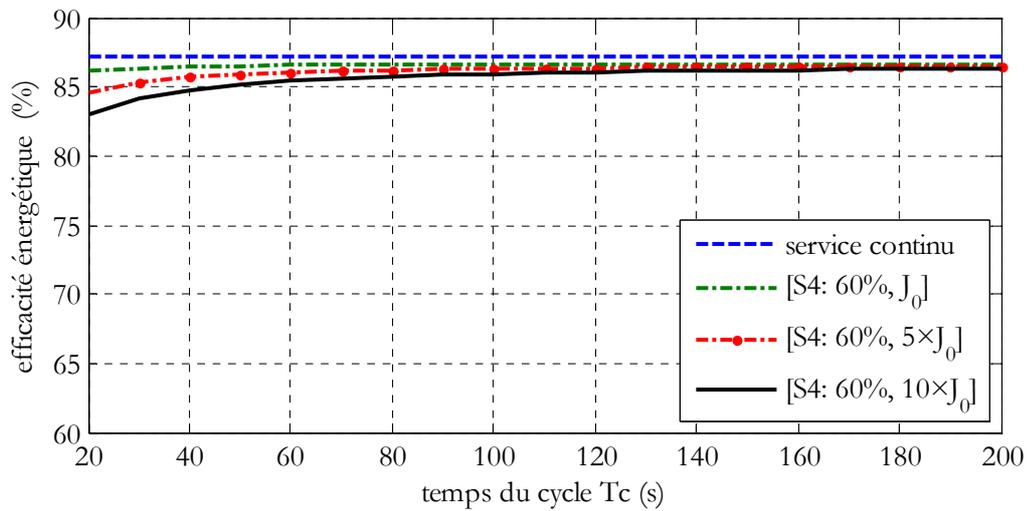


Figure 2-22. Rendement de la machine de référence en fonction de temps du cycle, pour un facteur de marche $F=60\%$

2.4. Méthode d'évaluation des impacts environnementaux

Cette section présente la méthode d'évaluation des impacts environnementaux tout au long du cycle de vie de la machine électrique. Elle décrit également les indicateurs d'impact définis par la méthode d'évaluation. Les phases du cycle de vie d'une machine électrique sont détaillées.

2.4.1. Description de la méthode d'évaluation

Le cycle de vie d'un produit s'entend « du berceau à la tombe », c'est-à-dire depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la mise au rebut [36]. Il s'agit de recenser l'ensemble des substances élémentaires consommées (matières premières, ressources naturelles, ...) ou produites (émissions dans l'air, l'eau, ..., produits secondaires et déchets) au cours du processus de fabrication du produit, puis de son usage et enfin de son recyclage partiel.

Pour la phase de fabrication, les substances à recenser, en entrée, incluent toutes les matières premières et ressources consommées pour aboutir à la réalisation du produit ciblé. Cela inclut les consommations directes (matières premières, gaz, pétrole, ...) utilisées dans les processus de transformation mais aussi les consommations indirectes (infrastructures, transport, ...). En sortie, on trouve principalement les émissions dans l'air, l'eau et les sols engendrées par l'ensemble des processus industriels qui créent le produit. Diverses bases de données quantifient les flux des substances pour la plupart des matériaux industriels (métaux en sortie d'aciérie, plastiques sous forme de granulés, ...) et pour les processus classiques qu'elles subissent (moulage, laminage, tréfilage, injection, ...). Pour cette étude, la base de données Ecoinvent qui possède plusieurs milliers de données a été retenue. Un exemple, exposant les flux entrants et sortants qui interviennent lors d'un processus industriel, (issus de la base Ecoinvent), est illustré dans l'Annexe A, page 143.

Une Analyse du Cycle de Vie a pour objectif d'évaluer les impacts environnementaux du produit cible. Un impact environnemental s'exprime généralement par une quantité équivalente d'une substance émise ou consommée par le produit étudié sur son cycle de vie. Ainsi, l'impact « réchauffement climatique » s'exprime en quantité de dioxyde de carbone (CO_2) produite. Comme de nombreux autres gaz agissent sur cet effet de serre, la méthodologie de calcul de l'impact va convertir les quantités émises de ces autres gaz en un équivalent CO_2 . Chaque impact environnemental est donc assorti d'une méthodologie d'agrégation qui va convertir les quantités de substances élémentaires associées au cycle de vie du produit en une quantité équivalente dans la substance retenue pour ce critère donné.

Il convient de souligner que les valeurs numériques obtenues à la suite d'une ACV sont à considérer avec prudence en termes de valeur absolue car la méthode d'intégration comporte nécessairement des choix arbitraires ; aucune estimation d'erreur n'existe dans les bases de données actuelles. Premièrement, la modélisation effectuée surestime ou sous-estime certainement des flux de matière sans qu'il soit possible a priori de savoir à quel point ces imprécisions sont négligeables ou non. Deuxièmement, les méthodologies d'agrégation, permettant de quantifier, en une unité unique, les impacts relatifs de diverses substances, reflètent l'état des connaissances environnementales à un instant donné. Les bases de données et les méthodologies de calcul des impacts sont donc régulièrement mises à jour. Ces remarques sont valables pour toutes les études ACV et ne sont pas particulières à la modélisation de moteur effectuée ci-après. En conséquence, les études environnementales de type ACV sont des outils d'évaluation destinés à comparer les produits entre eux, soit différentes versions et/ou utilisations du même produit (le moteur électrique par exemple). Le postulat généralement admis dans les études ACV stipule que les imprécisions sont très atténuées lorsque l'ACV compare des solutions technologiques relativement proches [37].

2.4.2. Critères des impacts environnementaux

Une étude environnementale se doit en effet d'être multicritère pour prendre en compte différents points de vue. Pour un produit cible, tous les critères environnementaux ne sont pas forcément corrélés ; certains peuvent même se révéler contradictoires. Cette étude reprend dix critères différents couramment utilisés dans le cadre des études ACV et elle s'appuie sur le logiciel « Simapro » qui intègre les méthodes d'agrégation nécessaires et notamment la méthode CML. Cette méthode a été développée par l'Institut des Sciences Environnementales de l'université de Leiden, aux Pays-Bas, en 1992 et révisée en 2000. Elle fait maintenant référence en ce qui concerne l'ACV des produits industriels [121]. Les dix critères d'impact, qui ont été retenus pour notre étude, sont détaillés dans le Tableau 2-6.

Ils comprennent notamment le critère d'énergie cumulative consommée (critère n°10, noté en abrégé 'Energie') et le critère des émissions de gaz à effet de serre (critère n°9, noté 'CO2'), qui sont particulièrement importants pour le potentiel de réchauffement climatique, mais aussi d'autres critères telles que le critère d'épuisement des ressources naturelles (critère n°1, noté 'R.nat.'), l'acidification (critère n°2, noté 'Acid.'), l'eutrophisation (critère n°3, noté 'Algues'), l'appauvrissement de la couche d'ozone (critère n°4, noté 'C.ozone'), la toxicité humaine (critère n°5, noté 'Toxi.'), l'écotoxicité de milieu aquatique (critère n°6, noté 'Poll. eau') et de milieu terrestre (critère n°7, noté 'Poll.sol') et, enfin, le critère d'oxydation photochimique (critère n°8, noté 'Oxyd.'). Tous ces indicateurs d'impact sont standardisés et exprimés dans le système des unités internationales (SI).

Tableau 2-6. Liste des critères d'impact retenus pour des études ACV

N°	Indicateur d'impact	Unité	Commentaire
1	Epuisement des recourses naturelles (R.nat.)	kg Sb éq	Cet indicateur est calculé pour chaque extraction de minéraux et de combustibles fossiles, il correspond à des ressources non renouvelables, exprimé avec une référence à un matériel équivalent rare : l'antimoine (Sb).
2	Acidification (Acid.)	kg SO2 éq	les oxydes d'azote et le dioxyde de soufre sont transformés en composés acides, et acidifient les milieux naturels avec des conséquences plus ou moins préjudiciables sur la faune et la flore jusqu'à des distances de l'ordre de 1000 km de leur lieu d'émission.
3	Eutrophisation (Algues)	kg PO4 éq	Les nitrates et les phosphates développent la biomasse végétale, dont le développement excessif entraîne une anoxie des milieux aquatiques, puis des dommages pour la faune et la flore (exemple : algues vertes)
4	Appauvrissement de la couche d'ozone (C.ozone)	kg FC11 éq	les composés halogénés réagissent avec l'ozone stratosphérique et entraînent une réduction de la couche d'ozone, à laquelle sont liés un certain nombre d'impacts environnementaux, en particulier sur la santé des êtres vivants dont l'homme
5	Toxicité humaine (Toxi.)	kg 1,4 DB éq	Cet indicateur exprimé en potentiel de toxicité humaine (HTP), pour chaque substance toxique Il est également exprimé compte tenu de la masse d'un produit équivalent toxique. Toxicité - Unité : kg éq 1,4 dichlorobenzène
6	Pollution de l'eau (Poll.eau)	kg 1,4 DB éq	Toxicité - Unité : kg éq 1,4 dichlorobenzène
7	Ecotoxicité terrestre (Poll.sol)	kg 1,4 DB éq	Toxicité - Unité : kg éq 1,4 dichlorobenzène
8	Oxydation photochimique (Oxyd.)	kg C2H4 éq	Les oxydes d'azote et les composés organiques volatiles réagissent pour former, hors centres urbains, une grande quantité de polluants secondaires dont l'ozone troposphérique, toxiques pour l'homme et la nature
9	Emissions de gaz à effet de serre (CO2)	kg CO2 éq	Ensemble des impacts environnementaux induits par l'augmentation de la température moyenne du globe due au pouvoir radiatif de certains polluants atmosphériques, et en particulier du dioxyde de carbone
10	Energie cumulative consommée (Energie)	MJ	Demande d'énergie primaire non renouvelable sur cycle de vie

2.4.3. Cycle de vie de la machine de référence

Le cycle de vie d'une machine électrique peut être schématisé par la figure 2-23. Une étude environnementale de type ACV d'un moteur électrique commence donc par la phase de construction. Le moteur est assemblé à partir d'un ensemble de matériaux élaborés qui subissent divers processus de conception.

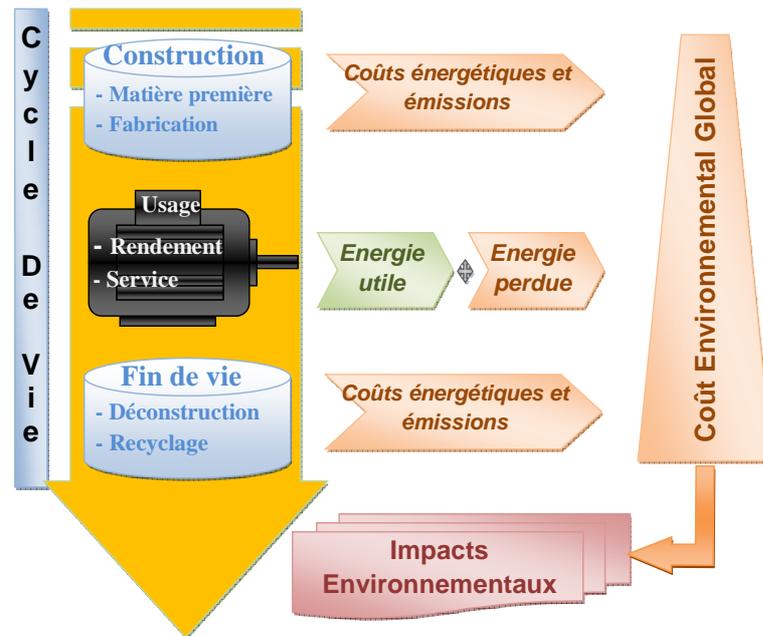


Figure 2-23. Cycle de Vie d'un moteur électrique et impacts environnementaux générés

La base de données Ecoinvent propose des données génériques pour la plupart des matériaux et processus courants. Pour ce qui relève des matériaux plus spécifiques, les données disponibles ont été adaptées. Grâce aux méthodologies d'agrégation des critères environnementaux, chaque matériau secondaire utilisé et chaque processus identifié se voit associé une valeur d'impact environnemental par unité de masse et ce, pour chacun des dix critères retenus. On obtient au final une matrice où les lignes correspondent aux dix critères et où les colonnes correspondent aux différentes matières et différents processus nécessaires pour construire un moteur (par unité de masse). Ceci étant réalisé, la modélisation d'un moteur électrique ne nécessite plus qu'un modèle géométrique permettant la prédétermination rapide de la masse de tous ses éléments constitutants.

La deuxième étape de l'étude environnementale consiste à évaluer les impacts de la phase d'usage de la machine. Lors de son utilisation, un moteur consomme de l'énergie électrique et produit une énergie mécanique utile au système dans lequel il est intégré. Il convient de ne retenir dans le cadre de l'ACV que l'énergie liée aux pertes. A ce niveau, il serait possible de considérer l'efficacité du système mécanique mis en mouvement dans son ensemble mais, pour rester générique, cette étude est strictement limitée au moteur d'entraînement. Cette étape nécessite donc d'évaluer le rendement de manière précise en considérant le régime de fonctionnement réel. Le second paramètre de la phase d'usage concerne la durée d'utilisation du moteur. Plusieurs scénarios seront étudiés dans la suite pour ce point. En effet, la durée d'utilisation dépend forcément de type de service de la machine. On a donc retenu un service où la durée d'usage est longue tel que le S1, et d'autres pour lesquels la durée est plus courte tel que le S2 ou le S3 et le S4 qui implique, à une durée égale, un rendement plus faible vu les phases de démarrage non négligeables qu'il comporte. L'énergie électrique perdue pendant l'usage va, elle aussi, impliquer des impacts environnementaux puisqu'elle nécessite en amont la production de cette électricité selon diverses sources. Chaque Joule consommé est donc générateur d'un impact environnemental selon chaque critère, qui dépend du système de production d'électricité du pays concerné.

La troisième étape concerne la fin de vie du moteur. C'est à ce stade que les matériaux constituant le moteur vont à leur tour devenir des déchets et des produits à valoriser (par exemple recyclage) et intervenir directement dans les différents impacts environnementaux retenus. Un scénario standard est retenu à partir de données figurant dans la base « Ecoinvent » et adapté avec les chiffres issus du bilan du recyclage 1998-2007 de l'ADEME. Il est à noter que dans cette étude, on ne prend pas en compte le transport du moteur sur son lieu d'exploitation. On obtient aussi pour la fin de vie une matrice où les lignes correspondent aux différents critères et où les colonnes représentent les impacts de chaque matériau constituant le moteur par unité de masse.

2.5. Résultats : Ecobilans énergétiques globaux

Une fois la modélisation effectuée (décomposition des éléments constituant le moteur avec leur processus, choix de l'électricité consommée, choix des scénarios de fin de vie et intégration des critères environnementaux), l'étude comparative de l'évaluation des impacts environnementaux est appliquée à notre machine électrique. L'outil d'ACV possède deux entrées variables (les masses et l'énergie perdue) et une sortie complexe (l'écobilan global). L'écobilan représente l'ensemble des impacts environnementaux générés tout au long le cycle de vie de la machine selon les différents critères. L'écobilan obtenu dépend de l'unité fonctionnelle qui représente une quantification de la fonction de la machine (temps de fonctionnement, type de service, durée de vie, origine d'électricité consommée). C'est à partir de cette unité fonctionnelle qu'il sera possible de comparer des machines différentes ou des conditions d'utilisations différentes.

2.5.1. Application à la machine de référence : évaluation des impacts environnementaux

La masse de chaque composant de la machine de référence est affichée dans le Tableau 2-7. Elle constitue la première entrée de l'ACV. Les paramètres du schéma équivalent monophasé de la machine sont donnés par le Tableau 2-8, à partir desquels, le rendement de la machine est calculé selon le type de service associé. En service continu, comme la machine travaille toujours en régime permanent, on utilise la méthode classique basée sur le schéma équivalent. En service intermittent, on utilise la méthode basée sur le modèle du vecteur espace qui nécessite de connaître les différentes inductances et résistances déduites à partir de paramètres présentés dans le Tableau 2-8. L'énergie cumulative perdue est donc déduite, ce qui permet d'avoir la deuxième entrée de l'ACV. En sortie d'ACV appliquée à notre machine de référence 10 kW, des écobilans globaux sont obtenus en considérant, lors de la phase d'usage du moteur, deux systèmes de production de l'électricité différents.

Tableau 2-7. Estimation des masses des matériaux utilisés pour la machine de référence 10 kW

Matériaux	Poids (kg)
Acier électrique	33,7
Autres acier	31,5
Aluminium	2,7
Cuivre	4,3
Plastique	0,3
Isolant	0,5
Vernis d'imprégnation	1,0

Tableau 2-8. Paramètres du schéma équivalent de la machine de référence 10 kW

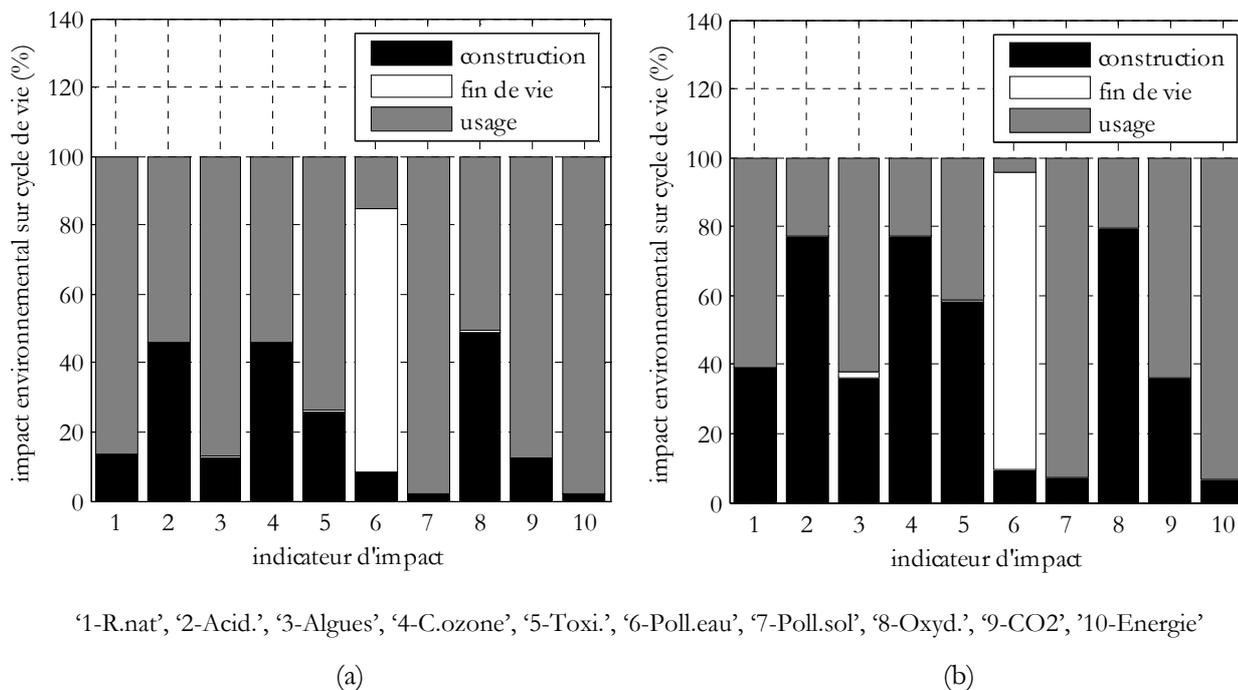
R_s (Ω)	X_s (Ω)	R_μ (Ω)	X_μ (Ω)	R'_r (Ω)	X'_r (Ω)
0,42	0,93	475	23,4	0,45	0,87

i. Impact environnemental global sur cycle de vie

Les résultats donnés à la figure 2-24, en (a) et (b), correspondent, lors de la phase d'usage de la machine, à un système de production d'origine française qui représente une part importante de production nucléaire. Durant la phase de la fabrication, on a utilisé toujours de l'électricité mixte européenne en considérant que le moteur est

fabriqué en Europe. Ces figures ci-dessous représentent deux scénarios différents de fonctionnement de la machine de référence 10 kW :

- ✓ Le premier scénario, en (a), suppose que la machine fonctionne 20000 heures de temps cumulatif (8 heures par jour ouvrable pendant 10 ans) en service continu S1 et avec un rendement nominal,
- ✓ Le deuxième scénario, en (b), considère un fonctionnement intermittent avec un facteur de marche de 25 %, type S3, qui ne prend pas en compte la baisse du rendement à cause de démarrage. Cela implique un temps de fonctionnement cumulatif de la machine de 5000 heures (2 heures par jour ouvrable pendant 10 ans).



L'analyse de la figure 2-24 (a) permet de dégager des points de repère pour le cas d'un moteur fortement utilisé (S1 – 20000 h). L'impact de la phase d'usage, directement lié à l'énergie perdue, est très important pour beaucoup de critères (1, 3, 5, 7, 9 et 10). Ils correspondent respectivement à : l'épuisement des ressources naturelles, l'eutrophisation, l'écotoxicité du milieu terrestre, l'émissions des gaz à effet de serre et l'énergie consommée cumulative.

Le critère 6 est assez différent des autres, il correspond à l'écotoxicité des milieux aquatique qui sont très sensible au rejet des matériaux lourds notamment la partie non recyclée des métaux. D'après les données de l'ADEME le cuivre rejeté dans les décharges s'oxyde et se retrouve à long terme dans l'eau ou le sol. Pour améliorer ce critère il faut travailler principalement sur la qualité des filières de recyclage des machines usagées.

Le coût environnemental de la phase de construction qui utilise de l'électricité mixte européenne reste non négligeable principalement pour les critères (2, 4 et 8) qui correspondent respectivement à : l'acidification, l'appauvrissement de la couche d'ozone et l'oxydation photochimique. L'amélioration de ces critères entre dans le cadre d'un processus beaucoup plus général de la réduction de l'empreinte environnementale des grands processus industriels.

Ce graphique montre que, pour une utilisation longue (20000 h), l'amélioration de l'efficacité énergétique des machines est le moyen le plus efficace d'améliorer globalement les impacts environnementaux produits.

Toutefois, il existe des applications industrielles ou domestiques où le temps cumulé d'utilisation des machines est faible. Dans le cas des services intermittents ou temporels avec, par exemple, un facteur de marche

de 25 %, le temps de fonctionnement cumulé des moteurs diminue à 5000 h. La figure 2-24 (b) montre très clairement que la phase de construction prend une importance nette pour quasiment tous les critères sauf le 6 (l'écotoxicité des milieux aquatiques), le 7 (l'écotoxicité du milieu terrestre) et le 10 (l'énergie consommée cumulative).

Les résultats de l'ACV dépendent fortement des conditions d'utilisation, comme par exemple, le temps de fonctionnement, la durée de vie, l'origine de l'énergie consommée, etc. Cela définit l'unité fonctionnelle de l'étude. Les résultats donnés à la figure 2-25, en (a) et (b), affichent les mêmes écobilans issus d'ACV pour les mêmes scénarios sauf que le système de production d'électricité est cette fois d'origine européenne et qui représente une part importante de production thermique.

On constate que la phase d'usage devient plus impactante selon tous les critères d'impacts retenus et dans les deux cas de scénarios considérés lorsque la machine consomme de l'électricité européenne. En effet, la production d'énergie d'origine nucléaire limite la consommation en ressources fossiles et diminue la production de CO₂. Néanmoins, il convient de noter que les critères environnementaux classiquement utilisés en ACV n'incluent pas les aspects tels que la sûreté nucléaire et le stockage à très long terme des déchets nucléaires.

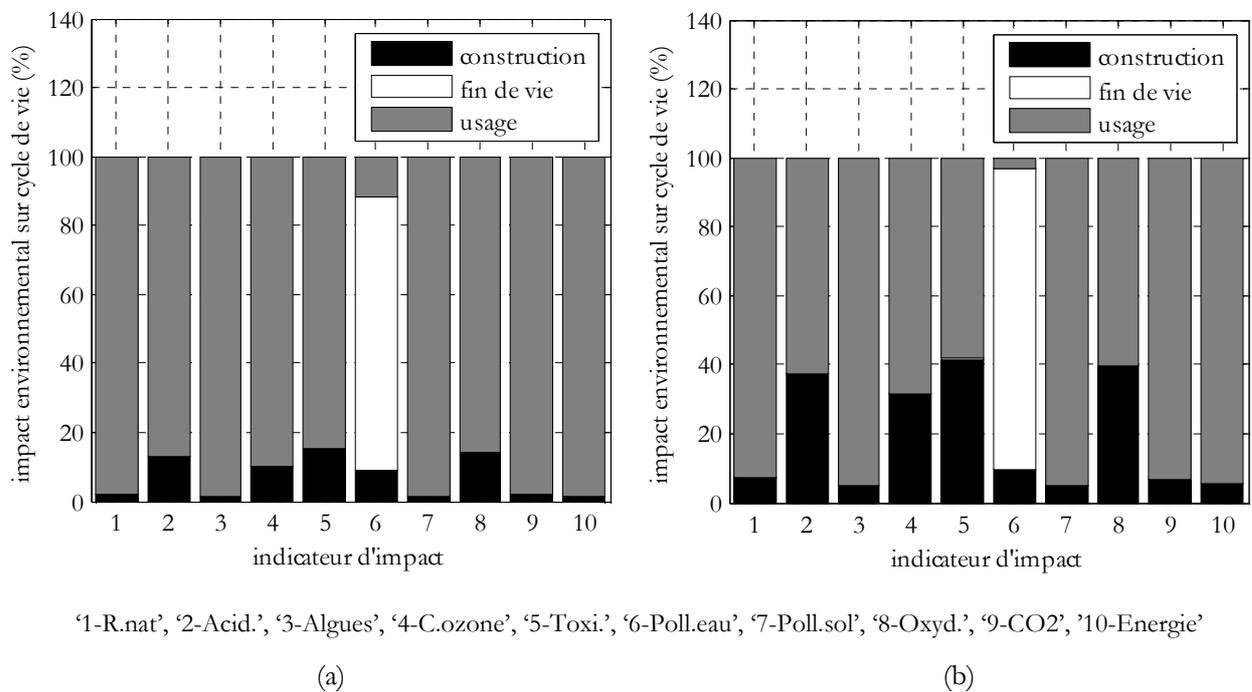


Figure 2-25. Ecobilan de la machine de référence dont l'électricité consommée est d'origine européenne pour un temps de fonctionnement cumulé de 20000 heures (a) et 5000 heures (b)

Toutes les courbes précédentes donnent les valeurs relatives, en pourcent, des impacts environnementaux évalués à une phase donnée par rapport aux valeurs totales sur cycle de vie. Le Tableau 2-9 donne les valeurs absolues totales des impacts environnementaux évalués sur cycle de vie de la machine 10 kW selon chaque critère d'impact et pour une électricité d'origine française. Le Tableau 2-10 affiche le même résultat mais pour une machine qui consomme, durant son usage, de l'électricité d'origine européenne. Comme complément d'information aux résultats affichés aux tableaux ci-dessous, on extrait à partir d'Ecoinvent quelques chiffres liés à la production de 1MJ de l'électricité basse tension en France et en Europe (cf. Annexe A, page 144).

Comme on l'a indiqué précédemment, l'évaluation environnementale de la machine électrique varie en fonction de plusieurs paramètres tels que le temps cumulé de fonctionnement et le type de service. Ce tableau contient les valeurs absolues des impacts, selon leur unité internationale associée, pour le service S1 avec 20000 heures de fonctionnement, le service S3 avec 5000 heures de fonctionnement et le service S4 avec 5000 heures de fonctionnement.

2.5 Résultats : Ecobilans énergétiques globaux

Tableau 2-9. Impacts environnementaux globaux de la machine de référence 10 kW, électricité d'origine française

Numéro	Indicateur d'impact	Unité	S1 ($F=100\%$)	S3 ($F=25\%$)	S4 ($F=25\%$, $c=72\text{d/h}$, $J=0,31\text{ kg.m}^2$)
			20000 heures, $\eta=87,2\%$	5000 heures, $\eta=87,2\%$	5000 heures, $\eta=83,4\%$
1	Epuisement des ressources naturelles	kg Sb éq	21,5	7,6	8,7
2	Acidification	kg SO ₂ éq	33,3	19,8	21,0
3	Eutrophisation	kg PO ₄ éq	1,35	0,47	0,6
4	Appauvrissement de la couche d'ozone	kg FC11 éq	0,00023	0,00013	0,00014
5	Toxicité humaine	kg 1,4 DB éq	3738	1673	1765
6	Ecotoxicité de milieu aquatique	kg 1,4 DB éq	1526	1238	1256
7	Ecotoxicité de milieu terrestre	kg 1,4 DB éq	249,96	66,05	83,25
8	Oxydation photochimique	kg C ₂ H ₄ éq	1,36	0,84	0,85
9	Emissions des gaz à effet de serre	kg CO ₂ éq	3177	1090	1255
10	Energie cumulative consommée	MJ	366508	96498	121817

Tableau 2-10. Impacts environnementaux globaux de la machine de référence 10 kW, électricité d'origine européenne

Numéro	Indicateur d'impact	Unité	S1 ($F=100\%$)	S3 ($F=25\%$)	S4 ($F=25\%$, $c=72\text{d/h}$, $J=0,31\text{ kg.m}^2$)
			20000 heures, $\eta=87,2\%$	5000 heures, $\eta=87,2\%$	5000 heures, $\eta=83,4\%$
1	Epuisement des ressources naturelles	kg Sb éq	118,4	31,82	39,8
2	Acidification	kg SO ₂ éq	90,8	34,23	38,6
3	Eutrophisation	kg PO ₄ éq	9,94	2,62	3,30
4	Appauvrissement de la couche d'ozone	kg FC11 éq	0,0008	0,0027	0,0032
5	Toxicité humaine	kg 1,4 DB éq	4977	1983	2163
6	Ecotoxicité de milieu aquatique	kg 1,4 DB éq	1424	1327	1222
7	Ecotoxicité de milieu terrestre	kg 1,4 DB éq	273	71	90,79
8	Oxydation photochimique	kg C ₂ H ₄ éq	3,68	1,42	1,59
9	Emissions des gaz à effet de serre	kg CO ₂ éq	16081	4316	5410
10	Energie cumulative consommée	MJ	338602	89521	112832

La machine fonctionne avec un rendement nominal de 87,2 % dans le service sans cycle de démarrage (S1 et S3). Tandis qu'avec le service S4 qui contient des cycles de démarrage non négligeables, le rendement de la machine diminue. A titre d'exemple, on considère un service S4 avec un facteur de marche 25 % (5000 heures), 72 démarrage/heure et une inertie totale 10 fois l'inertie de la machine. A partir de l'étude réalisée dans le paragraphe 2.3.4 page 50 qui est basée sur le modèle du vecteur espace et d'après la figure 2-21, on obtient un rendement de 83,4 %

La figure 2-26 compare les écobilans de la machine de référence fonctionnant 5000 heures avec et sans cycles de démarrage. Les résultats d'écobilan sont représentés en pourcentage d'impacts à l'aide d'un graphe présenté sous forme du radar et qui donne une vue globale pour les 10 critères retenus (10 axes). Avec cette présentation, chaque gain positif rapproche le point du centre du graphique. On remarque que l'influence des démarrages lors du service S4 est considérable sur l'efficacité énergétique du moteur et ainsi sur l'écobilan global de notre machine pour un même temps d'utilisation (5000 heures).

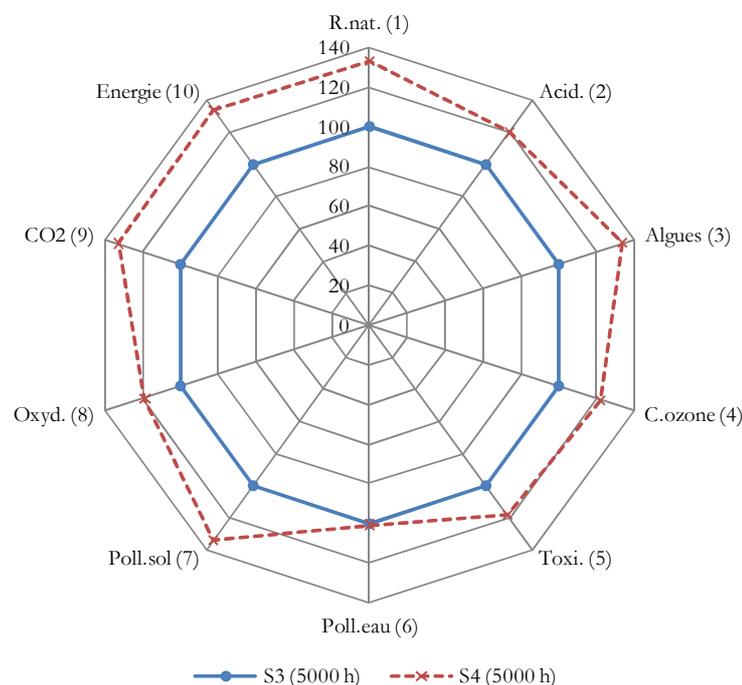
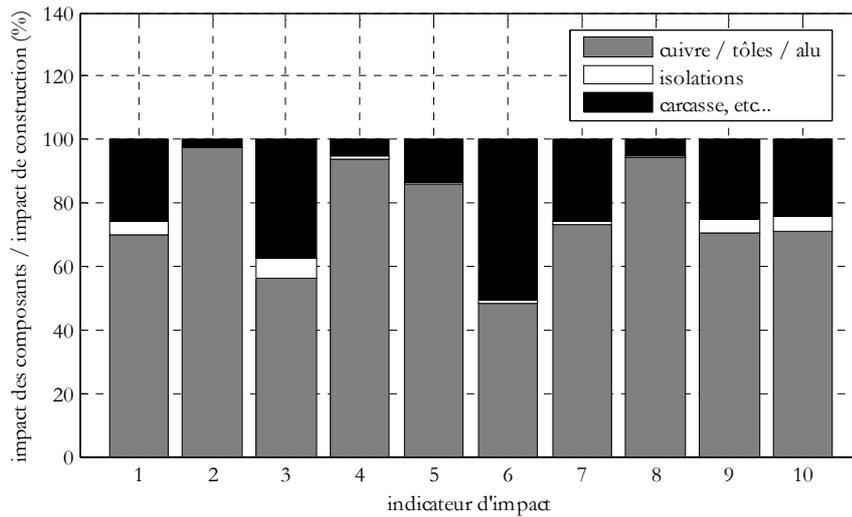


Figure 2-26. Comparaison en % des écobilans globaux de la machine de référence : S3 [$F = 25\%$, $c = 0$ d/b, $J = 0,31$ kg.m²] (trait continu) et S3 [$F = 25\%$, $c = 72$ d/b, $J = 0,31$ kg.m²] (trait pointillé), électricité consommée d'origine française

ii. Impact environnemental de construction et de fin de vie

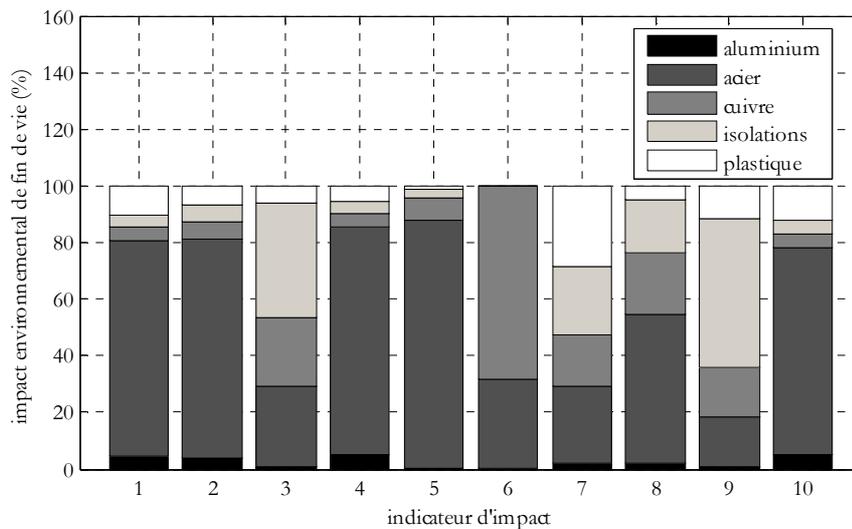
Afin d'étudier un peu plus en détail les phases de fabrication et de fin de vie du moteur de référence, regardons, sur ces phases, la contribution de chaque composant de la machine aux impacts environnementaux. On voit à la figure 2-27, que, durant la phase de construction de la machine, la partie active (cuivre, fer électrique, ...) représente au moyenne 70 % des impacts sur tous les critères.



'1-R.nat', '2-Acid.', '3-Algues', '4-C.ozone', '5-Toxi.', '6-Poll.eau', '7-Poll.sol', '8-Oxyd.', '9-CO2', '10-Energie'

Figure 2-27. Impacts environnementaux liés à la phase de construction

D'après les écobilans obtenus précédemment, l'impact de la phase de fin de vie de la machine reste, a priori, faible au regard des deux autres phases sur neuf critères parmi dix. L'exception vient du critère 6 associé à la toxicité de l'eau. Il faut noter que dans cette étude 70 % du cuivre et de l'aluminium ont été considérés recyclés ainsi que 45 % de l'acier, ce qui explique la faible part de la fin de vie sur l'écobilan global.



'1-R.nat', '2-Acid.', '3-Algues', '4-C.ozone', '5-Toxi.', '6-Poll.eau', '7-Poll.sol', '8-Oxyd.', '9-CO2', '10-Energie'

Figure 2-28. Impacts environnementaux liés à la phase de fin de vie

La figure 2-28 montre que le cuivre et l'acier, qui représentent l'essentiel de la masse du moteur, sont les matériaux les plus impactants selon tous les indicateurs d'impact et particulièrement le critère 6. Les masses de plastiques et d'isolants sont faibles dans un moteur, elles ne représentent respectivement que 0,3 % et 0,5 % de la masse totale du moteur. Leur impact environnemental sur la fin de vie varie pourtant de 5 % à 40 % selon les critères, soit un impact proportionnellement très important.

iii. Interprétation et discussion

La contribution de la phase de construction et d'usage dans l'écobilan énergétique global dans un cas de service intermittent est déterminée en fonction du nombre d'heures de travail de la machine 10 kW. La figure 2-29 montre l'évolution des 10 critères environnementaux en fonction du temps cumulé de fonctionnement de la machine de référence qui est, cette fois, prolongé au-delà de 20000 heures pour bien visualiser les tendances des courbes. Par souci de clarté, les critères présentant une évolution similaire sont confondus en un seul tracé.

La fin de vie n'est pas prise en compte dans cette figure qui comporte 5 courbes repérées par les lettres [(a), (b), ..., (e)]. Une courbe dépassant 50 % indique que, pour l'impact concerné, la phase de construction est plus importante que la phase d'usage.

La courbe (a) correspond aux critères 7 (écotoxicité de milieu terrestre) et 10 (énergie cumulative consommée). La courbe (b) correspond aux critères 1 (épuisement des recources naturelles), 3 (eutrophisation) et 9 (émissions de gaz à effet de serre). La courbe (c) correspond au critère 6 (pollution de l'eau). La courbe (d) représente le critère 5 (toxicité humaine). La courbe (e) représente les critères 2 (acidification), 4 (appauvrissement de la couche d'ozone) et 8 (oxydation photochimique).

La courbe (a) descend très vite cela signifie que pour les critères 7 et 10, l'impact environnemental de la phase de construction par rapport à l'impact total devient très vite négligeable : au-delà de 4000 h il est au-dessous de 12 %. La courbe (b) montre que cette tendance est moins forte pour les critères 1, 3 et 9. Les trois autres courbes montrent que l'impact environnemental de la phase de construction reste prépondérant plus longtemps pour les autres critères.

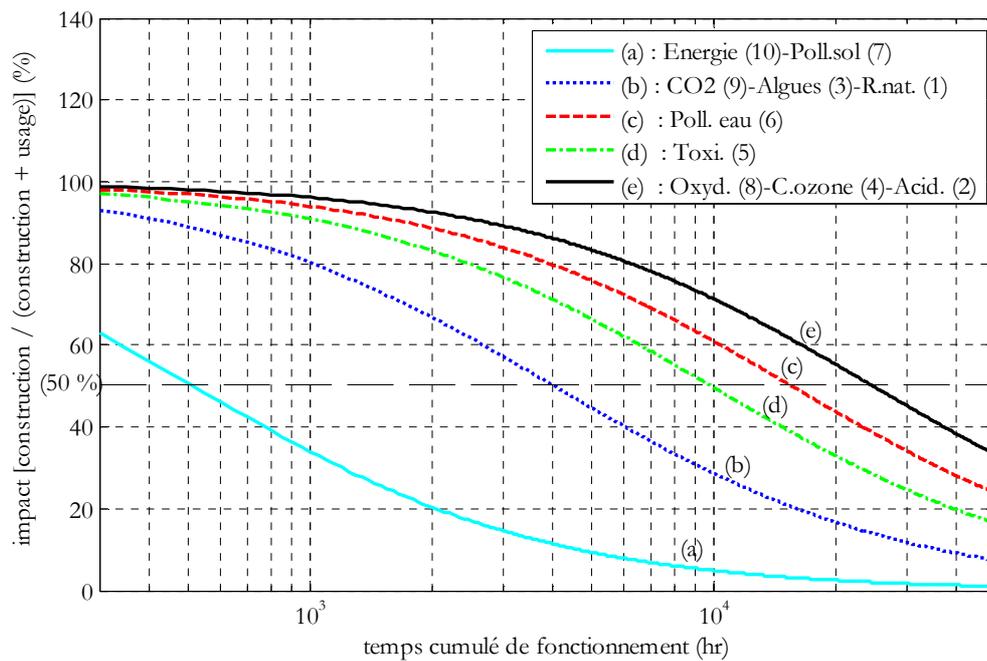


Figure 2-29. Contribution de la phase de construction et de la phase d'usage dans l'écobilan global de la machine de référence 10 kW en fonction de temps cumulé de travail (électricité d'origine française)

Cet ensemble de courbes permet de hiérarchiser l'importance relative de la phase de construction pour chaque ensemble de critères qui varient de la même façon pour le cas d'une machine électrique.

2.5.2. Contribution de l'ACV au choix d'un moteur électrique standard

L'ACV de la machine électrique représente un outil performant d'aide à la décision. Cette partie est dédiée à la présentation d'exemples qui montrent l'utilité de l'outil ACV lors du choix d'une machine standard destinée à une application industrielle. Cette analyse peut aider les utilisateurs à faire le meilleur choix possible en considérant le point de vue environnemental et, en même temps, les exigences du cahier des charges. L'étude proposée est basée sur le catalogue d'un fabricant de moteurs électriques, en l'occurrence celui de Leroy Somer.

i. Machine fonctionnant en service continu

Pour améliorer l'écobilan d'une machine en fonctionnement continu (20000 h), l'accroissement de l'efficacité énergétique représente la solution essentielle. En règle générale, les moteurs électriques sont conçus pour fonctionner avec le meilleur rendement entre 50 % et 100 % de la charge nominale et le rendement maximum est généralement obtenu à 75 % de la charge [122].

A titre d'exemple, pour une application qui requiert 11 kW, un moteur 15 kW peut être utilisé, son maximum de rendement étant obtenu justement vers 11 kW (75 % de 15 kW). Le choix d'un moteur légèrement surdimensionné a cependant un impact négatif sur la phase de construction. Une étude comparative d'ACV de deux moteurs Leroy Somer 11 kW et 15 kW, de même famille et utilisés pour une même application de charge 11 kW, est donc réalisée.

Les entrées nécessaires de l'étude ACV sont résumées dans le Tableau 2-11 et le Tableau 2-12. Le premier tableau qui est issu du catalogue « Leroy Somer » donne le rendement des moteurs en fonction du régime de fonctionnement. Le deuxième tableau donne les masses de matériaux constituant les machines ; il est obtenu à partir de la modélisation géométrique effectuée au début de ce chapitre sur la machine de référence et qui est transposable aux autres machines de même gamme de puissance en utilisant les dimensions géométriques données dans le catalogue.

Les résultats de l'ACV comparative sont illustrés par la figure 2-30. Cette figure compare les écobilans globaux des moteurs 11kW et 15 kW, sachant que l'électricité consommée est considérée d'origine européenne. Le moteur 11 kW est considéré comme référence dans cette présentation radar.

Tableau 2-11. Rendement des moteurs en fonction de la puissance en régime de fonctionnement, (catalogue Leroy Somer)

Données	LS – 11 kW			LS – 15 kW		
	4/4	3/4	2/4	4/4	3/4	2/4
Charge	4/4	3/4	2/4	4/4	3/4	2/4
Rendement (%)	87,7	88,4	87,5	88,7	89,3	88,3

Tableau 2-12. Matériaux divers utilisées pour les moteurs Leroy Somer

Matériau	LS – 11 kW (74 kg)	LS – 15 kW (86 kg)
Tôles électriques	45	54,1
Acier	14	16
Aluminium	9,4	10,6
Cuivre	4,3	5,1
Plastique	0,6	0,65
Isolants	0,6	0,7
Résine d'imprégnation	1,1	1,5

Le moteur de 15 kW est fabriqué avec des masses plus importantes des divers matériaux. L'impact environnemental de la phase de construction est donc logiquement supérieur. L'ACV globale montre un résultat

sensiblement différent. Pour une utilisation longue (20000 h) tous les critères sauf le 6 montrent une nette amélioration de l'écobilan général.

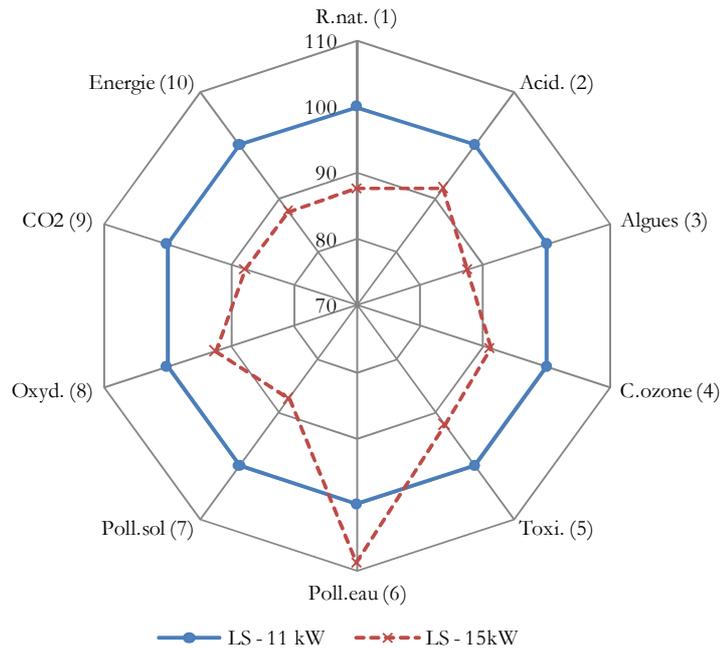


Figure 2-30. Comparaison en % entre les écobilans globaux de deux moteurs considérés (20000 h, électricité consommée d'origine européenne) pour une application à puissance constante à 11kW

Seul le critère 6 correspondant à la pollution d'eau avantage le moteur 11 kW. Cet impact, généré presque essentiellement en fin de vie, dépend directement de la quantité de métaux constituant le moteur et est donc toujours en faveur du plus petit moteur. Améliorer ce critère passe par une augmentation du taux de recyclage. Dans cette étude, on rappelle que le cuivre, l'aluminium et l'acier sont considérés comme étant recyclés respectivement à 70 %, 70 % et 45 % selon le scénario standard. Cette analyse montre l'importance du recyclage et, contrairement aux autres critères, une action réglementaire sur l'obligation de recyclage peut apporter une amélioration.

En service continu, cette étude montre que pour 9 critères sur 10, un moteur un peu surdimensionné fonctionnant à un régime autour de 75 % possède un écobilan meilleur qu'un moteur fonctionnant à son régime nominal.

ii. Machine fonctionnant en service intermittent

Les conclusions tirées de l'exemple précédent sont valables dans le cas d'un fonctionnement continu qui a été défini par 20000 heures. Est-ce vrai pour le cas du service intermittent où la machine fonctionne peu de temps pendant sa durée de vie ?

A titre d'exemple, on considère un autre scénario avec un fonctionnement à charge intermittente de 11 kW et à un facteur de marche 10 %. La machine fonctionne, par exemple, 200 heures par an pendant 10 ans, soit 2000 heures au total. Les résultats obtenus sont plus contrastés (cf. figure 2-31). Cela conduit à proposer un autre choix possible. Lorsque des moteurs fonctionnent dans un service intermittent type S2, S3 et S6 à facteur de marche faible, il est possible de les sous-dimensionner [90]. Pour ces types de service, la puissance du moteur est déterminée à partir de la moyenne quadratique de la puissance. Toutefois, la mise en mouvement de la charge suppose généralement un couple minimum qui interdit l'utilisation de machines trop petites, même si l'aspect thermique le permet. Ces remarques conduisent à envisager l'utilisation d'une machine de 9 kW à notre étude

pour fournir en service intermittent la charge de 11kW souhaitée (léger sous-dimensionnement plausible). Le Tableau 2-13 résume les différentes données qui ont été utilisées pour réaliser l'ACV en service intermittent.

Tableau 2-13. Données nécessaires pour l'ACV des moteurs électriques (catalogue Leroy Somer)

Données	LS – 9 kW	LS – 11 kW	LS – 15 kW
Régime	5/4	4/4	3/4
Rendement (%)	86	87,7	89,3
Poids total (kg)	60	74	86

Le résultat de l'ACV comparative est illustré par la figure 2-31 sous forme du radar qui compare les impacts environnementaux des moteurs en prenant le 11kW comme référence.

Cette étude montre qu'il y a une symétrie des critères. L'écobilan du gros moteur (15 kW) est meilleur selon cinq critères (épuisement des ressources naturelles, l'eutrophisation, l'écotoxicité terrestre, les émissions de gaz à effet de serre et la demande de l'énergie globale) et le petit moteur (9 kW) possède un meilleur écobilan selon les cinq autres critères.

Avec un temps d'usage total de 2000 heures, la figure 2-29 permet de constater que l'importance relative de la phase d'usage devient inférieure à 50 % sur les cinq critères en question. Le gros moteur, avec son meilleur rendement, conserve une phase d'usage moins impactante mais cela ne suffit plus à compenser sa surconsommation en matières premières et énergie lors de sa construction. Le raisonnement est inverse pour le cas du petit moteur. Quel moteur choisir en ce cas ? Se pose le délicat problème de l'importance relative des critères.

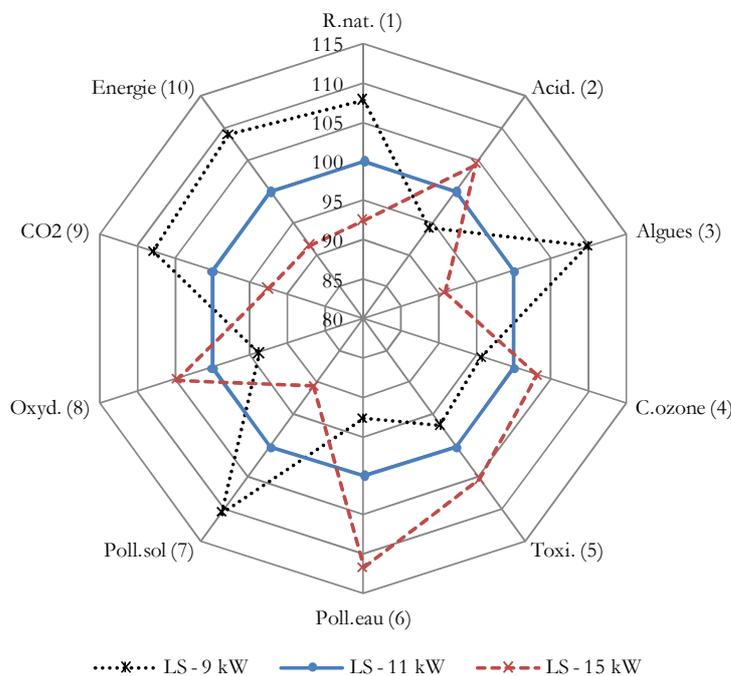


Figure 2-31. Comparaison en % des impacts environnementaux sur un cycle de vie des machines (11 kW // 15 kW) et (11 kW // 9 kW) fonctionnant en service continu (électricité consommée d'origine européenne)

Dans tous les cas, la figure 2-29 montre qu'en dessous de 2000 heures environ, l'importance relative de la phase d'usage commence à chuter également pour les critères (1, 3, 7,9 et 10). Donc, dans le cas d'un usage plus faible que 2000 heures, le choix du plus petit moteur va progressivement s'imposer. Lors d'un usage intermittent

à faible nombre d'heures de marche, le bon choix de conception consiste donc à diminuer les dimensions de la machine dans la limite de son échauffement maximum.

Influence de l'origine de l'électricité – Afin de compléter l'étude précédente, un autre facteur peut être pris en compte: l'origine de l'électricité consommée par les moteurs électriques. La figure 2-32 illustre la répartition d'origine de l'électricité par pays. La production d'énergie en France est largement d'origine nucléaire, ce qui limite la consommation en ressources fossiles et la production de CO₂.

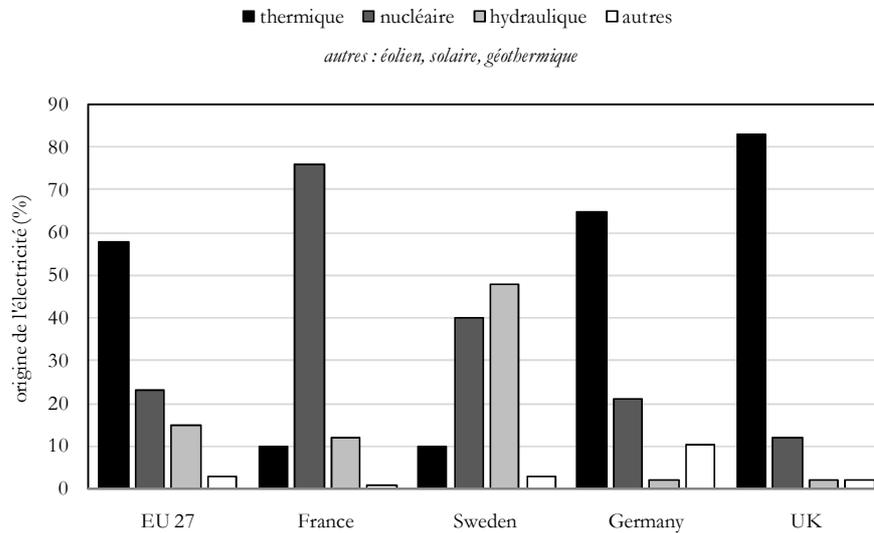


Figure 2-32. Origine de l'électricité en Europe en pourcent pour l'année 2008 (issu du document ADEME)

Les exemples précédents effectués dans le cas d'un fonctionnement intermittent (2000 heures) sont repris en considérant que l'électricité consommée, cette fois, durant la phase d'usage est d'origine française. La figure 2-33 montre que certains critères basculent favorablement vers le choix du petit moteur (moteur sous-dimensionné), contrairement au résultat présenté à la figure 2-31.

Cela traduit le fait que l'électricité nucléaire est moins consommatrice de ressources naturelles, moins productrice de gaz à effet de serre et moins productrice de rejets (nitrates et phosphates) que les centrales thermiques. A priori, au vu de ces résultats, le choix du plus petit moteur s'impose plus vite avec la diminution du temps d'usage lorsque l'électricité consommée est d'origine à dominante nucléaire.

Il convient de rappeler que les critères environnementaux classiquement utilisés par la méthode d'évaluation retenue CML ne prennent pas en compte des aspects tels que la sûreté nucléaire ou la dangerosité des déchets et donc que cet outil ne permet de tirer aucune conclusion sur ces questions sensibles. On rappelle que dans Simapro existe aussi une autre méthode d'évaluation impact 2002+ qui considère un indicateur de radiations ionisantes (exprimé en Bq C-14). Depuis le début de nos travaux, on a décidé d'utiliser pour notre étude d'ACV une méthode d'évaluation CML qui semblait être une référence en ce qui concerne l'ACV des produits industriels.

En service continu (20000 heures de fonctionnement), le résultat ne présente pas de différence notable quelle que soit la source d'électricité et le moteur surdimensionné a toujours un meilleur écobilan : la phase d'usage reste dominante et le rendement reste le critère essentiel.

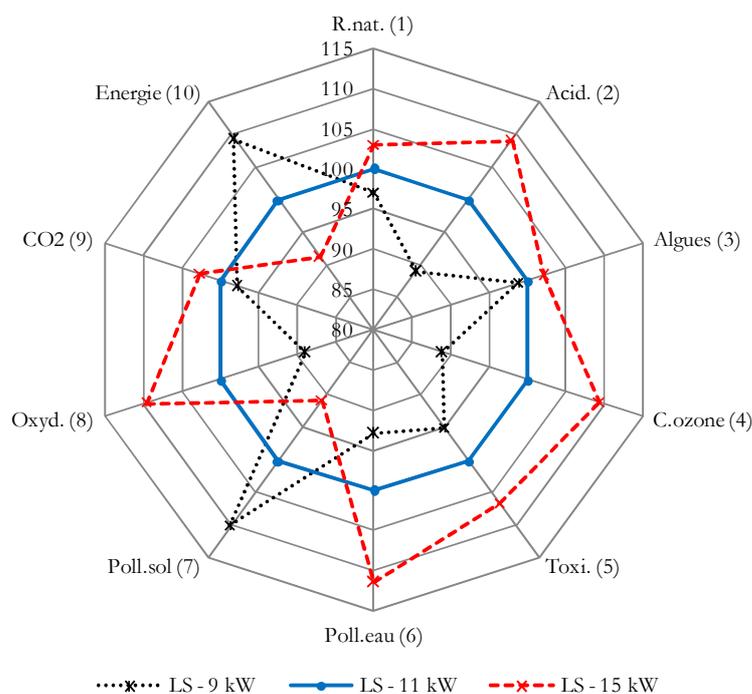


Figure 2-33. Comparaison en % des impacts environnementaux sur un cycle de vie des machines (11 kW // 15 kW) & (11 kW // 9 kW) fonctionnant en service continu (électricité consommée d'origine française)

iii. Récapitulatif

L'ACV comparative réalisée sur plusieurs machines asynchrones a permis de confirmer qu'en fonctionnement continu (20000 heures et plus) l'efficacité énergétique est le facteur clé du point de vue environnemental. Il est donc souhaitable de sur-dimensionner légèrement les machines électriques de manière à les faire fonctionner au rendement le plus élevé possible. Dans une même gamme technologique, les machines les plus grosses ont généralement un meilleur rendement et celui-ci est encore légèrement supérieur pour une charge d'environ 75%. Un surdimensionnement supérieur au seuil de 5/4 se révèle par contre inefficace en raison de la baisse de rendement. Lorsque le temps total d'usage diminue, il devient progressivement moins intéressant de prendre un moteur surdimensionné. Pour une application de charge fonctionnant en service intermittent à courte durée de fonctionnement (1000 heures et moins), le moteur choisi devra de préférence avoir une puissance inférieure à la puissance utile requise tout en respectant les contraintes thermiques liée à la température d'isolation et le couple de mise en mouvement. Entre ces deux extrêmes, le choix est plus difficile car les critères environnementaux s'opposent.

L'étude présentée compare des moteurs de même gamme, réalisés avec la même technologie. Les conclusions obtenues sont transposables à des moteurs de technologies différentes. Par exemple, pour améliorer le rendement d'un moteur, il est possible de choisir des moteurs de classe de rendement plus haute telle que la classe IE2 et IE3. Cependant, ces moteurs ont des processus de conception et utilisent des quantités de matériaux différents des moteurs IE1. Dans le cadre d'un usage continu (20000 heures ou plus), on peut, a priori, supposer que leur utilisation sera positive du point de vue de l'écobilan global car cette étude montre que, dans cette zone de fonctionnement, la phase d'usage et donc le rendement prime. Il convient toutefois d'être prudent car un changement technologique important peut affecter les critères pour lesquels la construction n'est pas négligeable. La conduite d'une étude ACV reste conseillée pour éviter tout problème de transferts de la pollution. Pour un usage inférieur, la phase de fabrication devient prédominante pour certains critères. Cela signifie que l'on doit raisonnablement conduire une étude ACV comparative pour valider le fait que les solutions de conception différente, en améliorant le rendement, ne créent pas d'impacts particulièrement négatifs sur les critères les plus sensibles à la phase de construction.

2.5.3. Contribution de l'ACV à la conception d'un moteur électrique

L'ACV peut aussi être utilisée par les concepteurs des machines électriques dans l'industrie afin de vérifier, dès la conception, les évolutions d'impact selon les éléments du moteur à concevoir. Deux exemples d'éco-conception de la machine électrique basée sur l'ACV sont exploités et appliqués à notre machine de référence 10 kW. Un exemple concerne la partie active de la machine et l'autre s'intéresse à la partie inactive de la machine.

i. Influence de la partie active sur l'écobilan

La modélisation par éléments finis de la machine de référence montre qu'elle était relativement saturée au point de fonctionnement nominal, ce qui est représentatif des machines industrielles fabriquées dans l'esprit d'investissement initial minimal. Cette saturation accroît les pertes, pour y remédier, on peut par exemple augmenter un peu le diamètre extérieur de la machine pour travailler plus loin du coude de saturation ; le diamètre extérieur a ainsi été augmenté virtuellement de 8 % en gardant toutes les autres cotes identiques. L'ACV a été refaite.

Les pertes Joule statoriques sont déterminées en se basant sur la simulation par éléments finis, les pertes fer sont estimées dans le post-traitement du logiciel Flux2D et les pertes fer rotoriques sont négligées. Le logiciel intègre la densité de flux sur tout le volume de fer statorique ; les pertes fer sont calculées en utilisant le modèle de séparation de pertes qui inclut les pertes par hystérésis, les pertes classiques et les pertes par excès.

Cette légère modification a de nombreuses conséquences. Du point de vue géométrique, seule la masse du fer est augmentée car les bobinages sont identiques. L'augmentation de la section offerte au flux dans la culasse statorique provoque comme prévu une réduction de l'induction dans cette zone et des pertes fer globales. Le courant magnétisant est légèrement réduit ce qui provoque une légère réduction des pertes Joule dans le stator. Cette analyse montre que le rendement augmente un peu. Le Tableau 2-14 résume les paramètres influencés par cette légère modification géométrique.

Tableau 2-14. Résumé des paramètres influencés par le changement géométrique

Données	Diamètre extérieur stator (mm)	Masses tôles stator (kg)	Courant statorique (A)	Pertes fer (W)	Pertes Joule (W)	Rendement à la puissance nominale (%)
Moteur référence	200	21,2	23,04	290	653	87,35
Moteur modifié	216	28,3	22,79	249	639	87,70

En ce qui concerne les pertes durant la phase d'usage, le résultat indique que le moteur modifié est meilleur. Cependant, la nouvelle approche basée sur l'outil ACV permet de faire une analyse plus détaillée selon les 10 critères d'impact. La figure 2-34 compare les écobilans globaux de la machine de référence et celle modifiée fonctionnant dans un service continu 20000 heures et consommant de l'électricité Française.

La comparaison des résultats ne peut pas donner une réponse simple sur les bénéfices de changement géométrique effectuée, elle est effectivement meilleure sur les critères 9 et 10, liés au CO₂ et habituellement mis en avant. Les critères 3, 5 et 7 sont également un peu améliorés mais ces résultats positifs sont obtenus au dépend des autres critères (2, 4, 6 et 8), à cause de l'augmentation légère de la masse des tôles magnétiques et ainsi le coût environnemental de leur fabrication. Ce résultat peut être expliqué par retour à la figure 2-29 qui synthétise le coût environnemental relatif de la phase de construction. Pour les indicateurs (2, 4, 6 et 8) les impacts de la phase de construction sont importants même pour de temps de fonctionnement long. Pour un usage à 20000 heures, le choix du " meilleur moteur " est donc délicat, il suppose une expertise environnementale et une hiérarchisation des critères.

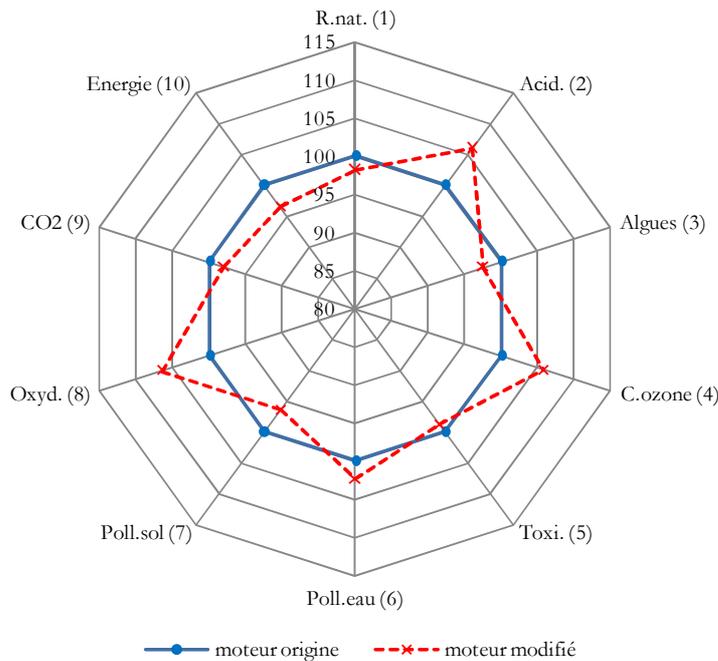


Figure 2-34. Comparaison en % des écobilans des moteurs d'origine et celui modifié pour un fonctionnement de 20000 heures (électricité d'origine française)

Si le temps de fonctionnement de la machine diminue et se divise par trois ou quatre, à titre d'exemple (5000 heures), d'après la figure 2-35 le moteur modifié malgré sa meilleure efficacité, devient moins intéressant et le bon choix de conception devient assez nettement le moteur le plus saturé et plus petit (celui de référence). Cet exemple montre que contrairement aux idées reçues, meilleur rendement et meilleur moteur ne sont pas toujours synonymes.

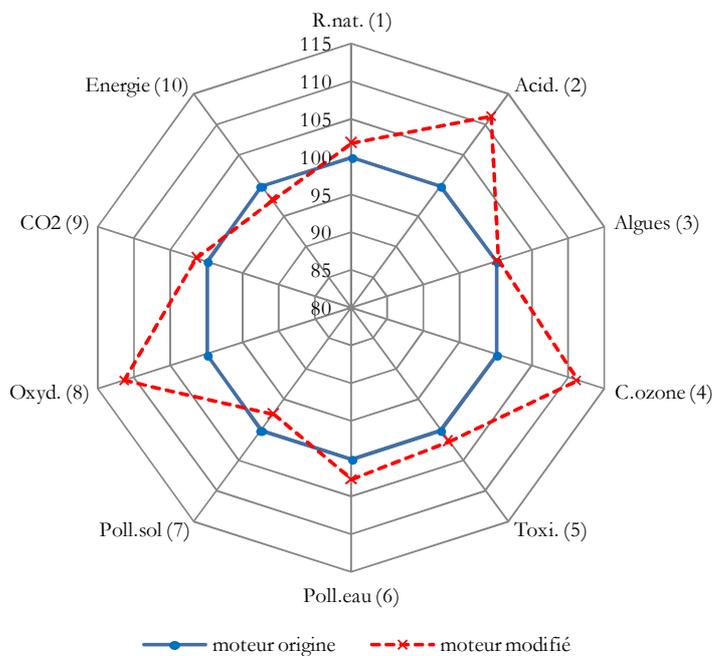


Figure 2-35. Comparaison % des écobilans des moteurs d'origine et celui modifié pour un fonctionnement de 5000 heures (électricité d'origine française)

Cette analyse montre encore une fois que l'estimation du temps de fonctionnement du moteur est un élément important de l'éco-conception d'une motorisation.

ii. Influence de la partie inactive sur l'écobilan

Ce nouvel exemple s'intéresse cette fois à la partie inactive de la machine: le choix du matériau du capot de ventilateur et de la boîte à bornes qui sont respectivement fabriqués en acier et aluminium dans le moteur de référence. Lorsque l'on aborde le moteur électrique sous le seul aspect de l'efficacité énergétique, les parties inactives sont tout simplement occultées, ce n'est pas le cas avec une ACV. Pour ces composants, il est possible de choisir un autre matériau, par exemple un plastique (PVC) qui répond aux contraintes mécaniques et thermiques demandées. Trois matériaux distincts sont ainsi proposés avec une épaisseur supérieure pour le plastique afin d'assurer la résistance mécanique adéquate (l'épaisseur de matériau plastique est deux fois de celle du fer et d'aluminium). Leurs impacts environnementaux, qui englobent les impacts des matériaux eux même et leurs processus de construction, sont comparés à l'aide de notre outil d'ACV. Les résultats sont présentés sur la figure 2-36.

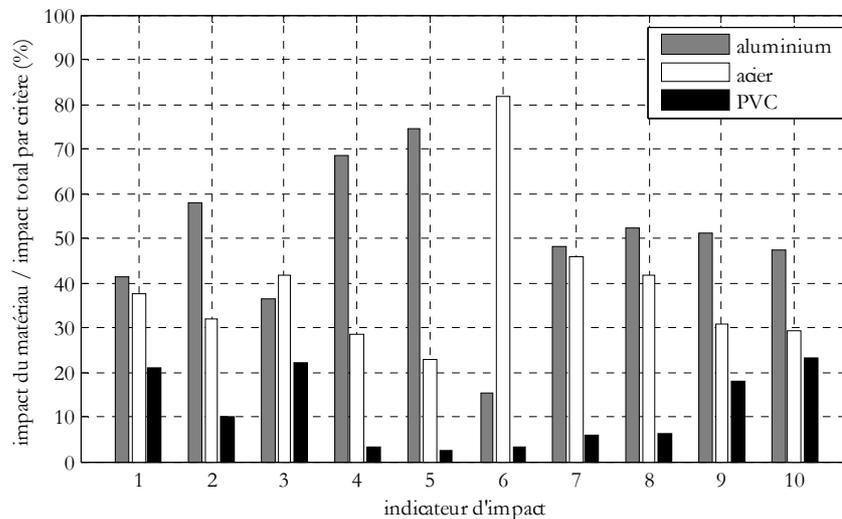


Figure 2-36. Comparaison des impacts des divers matériaux envisagés pour les composants "inactifs" de la machine

Au vu des résultats, il apparaît clairement que malgré les idées communément admises, le PVC est le matériau le plus adapté pour construire ces pièces inactives. La raison est simple : l'acier et l'aluminium sont énergivores lors de la phase de construction. A contrario, en ce qui concerne les plastiques, c'est en phase de fin de vie que l'essentiel des impacts vont se retrouver. La solution viendra certainement des nouveaux plastiques d'origine végétale, à faibles impacts en fin de vie. Cette idée sera étudiée plus en détail dans le chapitre suivant de ce manuscrit.

2.6. Conclusion

Appliquer l'éco-conception aux motorisations électriques est une nouvelle démarche de conception qui prend en compte les performances énergétiques et l'impact environnemental multicritère de la motorisation sur l'ensemble du cycle de vie. La modélisation de la phase de fabrication nécessite une étude géométrique de la machine afin de déterminer automatiquement les masses des différents constituants de la machine (acier électrique, aluminium, cuivre, isolants, matières plastiques...). Pendant la phase d'usage, la machine fonctionne en service continu ou intermittent. La détermination du coût énergétique de cette phase est basée sur un bilan

énergétique effectué à partir de la modélisation électrique de la machine par la méthode du vecteur espace, avec la prise en compte des pertes fer et pertes supplémentaires en charge, ou du schéma équivalent monophasé pour le régime permanent. Les paramètres des modèles sont déduits de la géométrie. La phase de fin de vie de la machine est modélisée par un scénario de recyclage standard, complété par des chiffres issus d'un bilan de l'ADEME réalisé en 2008.

L'application de l'approche ACV à la machine électrique permet ainsi d'évaluer ses impacts environnementaux produits tout au long de son cycle de vie en fonction de son type de service. L'évaluation est basée sur une méthode multicritère qui permet d'éviter le transfert de pollution d'un critère vers un autre. Chaque phase de cycle de vie de la machine a sa propre contribution sur l'impact environnemental. Les phases de construction et d'usage représentent les phases les plus impactantes du cycle de vie de la machine. L'impact de la fin de vie de la machine est très faible sur tous les critères sauf un, la pollution de l'eau, qui est lié à la part de métaux non recyclés dans la machine. La solution pour réduire cet impact est simple, bien que difficile à mettre en œuvre, il suffit de tendre vers 100 % de recyclage des métaux utilisés dans les moteurs.

Les contributions relatives des phases de construction et d'usage de la machine aux impacts environnementaux sont liées au temps de fonctionnement total de la machine durant sa durée de vie. Pour chaque critère, il existe une première zone, à faible temps d'usage, où la phase de construction est dominante et, donc, où la réduction de l'impact environnemental passe uniquement par l'optimisation de la masse de la machine. De même, il existe une deuxième zone, à fort temps d'usage, où la phase d'usage est dominante et, donc, où l'accroissement de l'efficacité énergétique de la machine est essentiel. Entre ces deux zones, il y a une zone intermédiaire où les contributions de chaque phase sont proches et l'amélioration environnementale passe par une optimisation sur le cycle de vie total.

Les critères possèdent des échelles de temps différentes. Au-delà de 20000 heures d'usage ou en dessous de 1000 heures d'usage, tous les critères se trouvent dans des zones où les choix sont nets (zone 2 et zone 1). Entre ces deux intervalles, usage et construction auront toujours des contributions proches pour au moins quelques critères et donc le choix du « meilleur » moteur devient plus délicat car il faudra certainement pondérer l'importance relative de chaque critère environnemental. Le choix ou le dimensionnement de la machine électrique doit tenir compte de l'importance relative de la phase de construction pour le nombre d'heures cumulatives de travail affecté à la machine durant sa phase d'usage.

Pour imager cette conclusion citons deux exemples ; le cas des moteurs montés dans les automobiles en général, que ce soit le cas des véhicules électriques, hybrides ou thermiques classiques. Pour cette application, la durée d'utilisation est relativement courte : quelques heures par jour. Même en gardant une voiture très longtemps, il est difficile d'atteindre 5000 h d'utilisation. Pour ce secteur industriel dans son ensemble, le coût environnemental de la construction du moteur est prépondérant. Inversement l'aéronautique conçoit des avions pour une trentaine d'années et les compagnies aériennes les font voler 18 à 20 h par jour ce qui fait un temps d'utilisation estimé de 160000 h. Les machines sont branchées sur le réseau de bord qui fonctionne grâce au kérosène embarqué. Pour ces machines l'impact environnemental de la phase de construction sera tout à fait négligeable.

L'étude présentée dans ce chapitre peut aisément conduire au développement d'un outil informatique qui aide à la décision lors de la conception des motorisations électriques en milieu industriel. Cela aura des retombées positives à moyen et long termes car les motorisations électriques correspondent à une part importante de l'électricité consommée dans les entreprises. Après cette évaluation des impacts environnementaux d'une machine de référence standard existante, on proposera dans le prochain chapitre des pistes d'améliorations environnementales utilisant de nouvelles structures au niveau de la conception de la machine électrique.

Chapitre 3 :
Pistes d'amélioration de l'écobilan
d'une machine standard

3. Pistes d'amélioration de l'écobilan d'une machine standard

3.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, l'écobilan énergétique global d'une machine électrique standard a été présenté. L'étude étant paramétrable, il a donc été possible de comparer rapidement diverses versions de moteur à technologie équivalente. La machine de référence retenue pour cette étude est représentative des machines industrielles, c'est-à-dire dimensionnée dans l'esprit du coût financier minimal et du respect des contraintes techniques minimales. Une autre démarche a été proposée, elle tient compte de l'ensemble du cycle de vie, de la contribution relative non négligeable de chaque partie de la machine (active ou inactive) à l'impact environnemental global (fabrication, usage, démantèlement et recyclage).

Dans ce chapitre, diverses solutions pour améliorer l'écobilan de ces machines électriques sont envisagées : utilisation de tôles magnétiques de hautes performances, mise en œuvre de fils émaillés nouveaux à faible impact environnemental, utilisation d'un procédé de thermocollage des bobinages en remplacement des techniques actuelles d'imprégnation, remplacement des plastiques classiques issus de la pétrochimie par des matériaux biosourcés. Toutes ces modifications sont faites sans changer aucune dimension de la machine de référence.

Ces solutions ont été étudiées en collaboration avec divers partenaires industriels. D'abord, "ThyssenKrupp Electrical Steel" nous a fait bénéficier de son expertise dans le domaine de la production des tôles magnétiques. Ensuite, les sociétés "ACEBSA" et "GII" nous ont fourni le nouveau fil émaillé sans solvant et thermocollable. Enfin, le laboratoire UCCS nous a prêté son concours pour l'intégration de bio-polymères dans le moteur.

3.2. Système d'isolation électrique sans solvant

L'écobilan des machines électriques, même s'il valide l'importance toute particulière du rendement, se différencie de l'étude classique basée sur ce rendement, par entre autres la prise en compte des parties inactives de la machine. Ainsi les diélectriques, s'ils contribuent à la durée de vie du moteur, n'interviennent pas directement sur son rendement. L'analyse fine des impacts montre que, proportionnellement au poids qu'ils représentent dans un moteur (0,5 %), leur influence environnementale est importante notamment en phase de fabrication et de fin de vie. La production d'un fil moins impactant du point de vue environnemental n'est pas négligeable. Dans ce paragraphe, une comparaison entre fil émaillé classique avec imprégnation et une nouvelle technologie de fil avec thermocollage est présentée. Les résultats sont ensuite analysés du point de vue environnemental.

Les fils émaillés utilisés pour réaliser les bobinages des machines électriques et des transformateurs sont classifiés en premier lieu par leurs indices thermiques, c'est-à-dire qu'ils doivent résister à une température donnée pendant 20000 heures sans perdre plus de 50 % de leurs propriétés diélectriques (méthode de validation décrite dans la norme CEI 60172) [123]. Il existe ainsi des fils de classe 120°C, 155°C, 180°C, 200°C, 220°C et 240°C. De plus, chaque famille doit répondre à des exigences mécaniques, électriques, et chimiques sévères qui répondent à des normes internationales référencées par la commission électrotechnique internationale (CEI). La fabrication du fil émaillé est une opération complexe, énergétiquement coûteuse et relativement polluante ce qui présuppose des impacts environnementaux conséquents. Le procédé classique d'émaillage consiste à appliquer

successivement de très fines couches de vernis sur le fil de cuivre (typiquement 12 passages dans le bac de vernis et dans le four d'émaillage [124] porté à une température de l'ordre de 600°C). Énergétiquement, le procédé est donc coûteux. La polymérisation des couches isolantes est obtenue par l'action combinée de la chaleur et des solvants inclus dans le vernis initial. Ce qui crée, malgré le traitement des effluents, une pollution certaine au voisinage des unités de production.

Les résines sont des monomères en solution dans des solvants classés en produits nocifs ou cancérigènes (crésols, solvants aromatiques tels que le xylène, N méthyl pyrrolidone, ...). Plusieurs familles chimiques sont utilisées en fonction de l'utilisation du fil : formal polyvinylique, polyurethane, polyester, polyester-imide, polyamide, polyamide-imide, polyimide. La concentration de la résine dans les solvants se situe entre 15 et 40 %, c'est à dire qu'environ 60 % du produit utilisé s'évapore et doit être traité, ce qui n'empêche pas une infime partie d'être rejetée directement dans l'atmosphère [124]. De plus, la réaction exothermique de ces solvants génère naturellement beaucoup de CO₂ dont on connaît l'incidence écologique. La consommation annuelle des vernis d'émaillage en Europe est de 40.000 tonnes, soit 26.000 tonnes de solvants à éliminer [125].

Une solution alternative de conception de fils émaillés a été mise au point ces dernières années ; elle est basée sur un processus de polymérisation par UV qui n'utilise aucun solvant. Cette nouvelle technologie permet également, de manière simple, d'ajouter au fil une surcouche de vernis thermo-adhérente. L'objectif est de supprimer l'imprégnation ultérieure des bobinages, imprégnation elle-aussi réalisée avec des vernis à solvants.

Dans ce qui suit, les propriétés mécaniques (test de force de collage) et électriques (test de décharges partielles) du bobinage thermo-adhérent à base du nouveau fil UV sont comparées à celles du bobinage imprégné à base de fil standard. Ensuite, les impacts environnementaux du fil classique et du fil thermo-adhérent polymérisé par UV sont comparés. La démarche d'analyse sur cycle de vie (ACV) présentée précédemment est utilisée.

3.2.1. Description du nouveau processus d'émaillage

Le fil le plus standard, de classe 220°C, est isolé par une couche de polyester-imide et une surcouche de polyamide-imide qui sont déposées grâce aux solvants inclus dans le vernis initial et polymérisées dans des fours d'émaillage (figure 3-1, schéma de gauche). Le nouveau fil est isolé par une couche de résine photoréticulable chargée par des oxydants minéraux et une surcouche d'un polymère thermostable.

La partie droite de la figure 3-1 décrit le nouveau processus de polymérisation de fil émaillé. Des UV sont utilisés pour amorcer des réactions sur des résines (oligomères) en solution dans des diluants réactifs (monomères) qui ne dégagent lors de la polymérisation ni COV et ni CO₂.

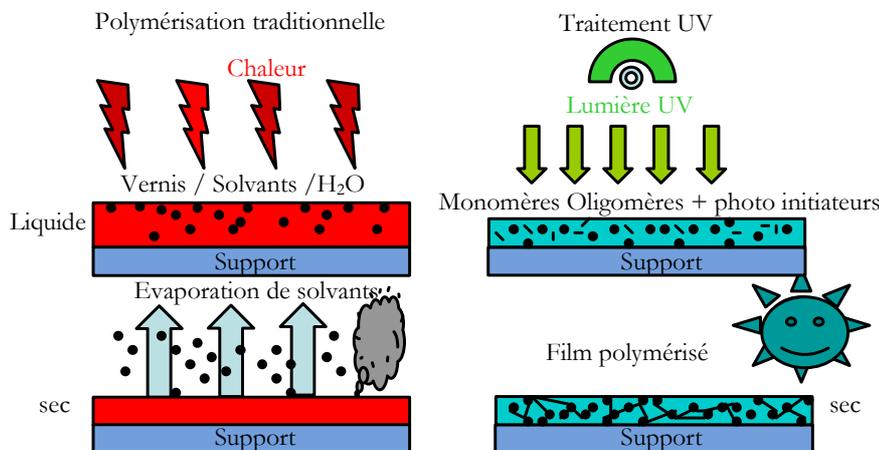


Figure 3-1. Comparaison des procédés d'émaillage [124]

Cette nouvelle technologie développée par GII et ACEBSA présente des similitudes avec le processus traditionnel à savoir que la réaction se fait sur le fil et permet ainsi d'atteindre les caractéristiques exigées notamment l'adhésion. Les avantages de cette technologie sont divers :

- pas de solvant dans les vernis utilisés
- pas de pollution atmosphérique
- rentabilité : la vitesse de la ligne peut être multipliée par 2 ou 3 en fonction du diamètre

Certains tests standardisés ont été réalisés sur le nouveau fil polymérisé par UV (cf. Tableau 3-1). Ils répondent aux exigences de la norme CEI 60 317-1 [126].

Tableau 3-1. Caractéristiques du nouveau fil polymérisé par UV, données fournies par GII et ACEBSA

Diamètre de fil	0,95 mm Grade 2B	
Augmentation du diamètre	85 μm	
Tension de claquage	8,3 kV	
Rigidité diélectrique dans un bain à billes	6,3 kV	
Rigidité diélectrique dans un bain à billes avec 10 % de pré-étirage	4,3 kV	
Thermo-plasticité	>350°C	
Tension de claquage après revêtement par le vernis d'imprégnation	143947	8,6 kV
	FT 2015	10,2 kV
	E 524	9 kV
	578E330	8,6 kV
	B819	10,4 kV
donnée thermique	5000 heures à 240°C	

3.2.2. Test comparatif de performance mécanique: Force de collage

La fiabilité d'un moteur électrique dépend pour partie de la tenue mécanique de ses bobinages. Il faut donc que les fils thermocollés aient des propriétés de collage au moins équivalentes à celles obtenues avec les vernis d'imprégnation. Pour cela, des essais similaires ont déjà été réalisés. On peut citer notamment ceux effectués à Toulouse au sein du laboratoire de Laplace, où des tests comparatifs de force de collage sur des éprouvettes normalisées (CEI 60455-2) ont permis de comparer un vernis standard à un vernis chargé par des micro et nano particules, l'objectif étant d'améliorer la tenue électrique contre les décharges partielles [127-128].

La force nécessaire à la rupture de la bobine est une mesure du pouvoir agglomérant. Les essais normalisés doivent être répétés à des températures élevées selon les normes CEI 60851-3 et CEI 61033 [129-130]. Notre objectif, pour ce paragraphe, est de comparer trois fils polymérisés par UV thermocollants et réalisés avec des surépaisseurs différentes de vernis thermo-adhérent (mini grade 20 μm , maxi grade 40 μm et surdimensionné 65 μm), les résultats sont comparés au référentiel «fil classique imprégné». Les bobines de test obtenues avec le fil classique sont imprégnées par un vernis très répandu de référence HI-THERM BC-346/A à base de résine polyester avec une résistance à la chaleur de 20000h à 215°C et de 40000h à 205°C. Il existe d'autres types de vernis à base de résines époxydes, de silicones,... Le choix a été fait en concertation avec différents professionnels du bobinage des moteurs et transformateurs : le produit HI-THERM BC-346/A est un produit standard utilisé depuis nombreuses années. Les bobines torsadées réalisées avec du nouveau fil thermo-adhérent sont pour leur part collées par l'application d'un courant continu qui, en chauffant le cuivre, va faire fondre la surcouche adhérente.

i. Préparation des échantillons

Diverses normes américaines telles que NFC 26 937 et ASTM 2519 utilisent des bobines à spires jointives hélicoïdales pour faire ce type de test, pour sa part ce travail s'appuie sur les normes CEI 60851 et CEI 61033, la préparation de l'éprouvette consiste à réaliser un bobinage en vrac de forme ovale avec le fil. Celui-ci est alors torsadé tout en appliquant une force qui assure une tension de 100N, puis collé par un traitement spécifique

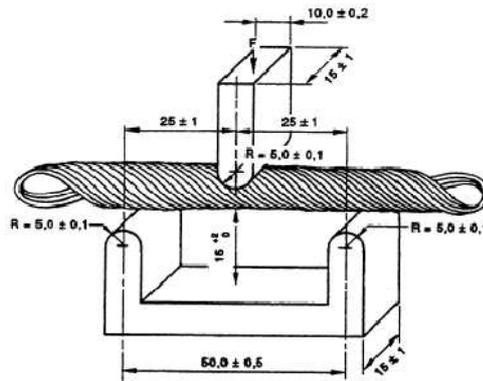
(figure 3-2). Les éprouvettes ainsi obtenues ont la forme d'une tige d'une longueur de 85-90 mm et de diamètre 7 mm.

Les éprouvettes réalisées en fil classique sont collées avec le vernis d'imprégnation. La bobine torsadée, en position verticale, est immergée dans le vernis pendant 5 min. Ensuite, l'éprouvette est retirée et égouttée en position horizontale pendant 10 à 15 min. Au final, on polymérise les éprouvettes dans une étuve. Le temps d'étuvage a été fixé à 1 h à 165°C en conformité avec les directives du fournisseur. De manière industrielle, les bobinages thermo-adhérents sont collés de manière similaire dans une étuve chauffée. Dans le cadre de cette étude, les éprouvettes réalisées en fil thermo-adhérent de classe 220 °C sont collées par l'application d'un courant continu au fil conducteur. Les résultats de collage sont identiques à condition de bien maîtriser le couple (courant, temps) de manière à ne pas dégrader l'isolant de l'éprouvette.



(a)

(b)



(c)

Figure 3-2. Disposition des appareils du montage : (a) système de torsion d'éprouvette, (b) système d'application de la force, (c) disposition des supports standard

ii. Temps de chauffage des éprouvettes «thermo-adhérentes»

Le collage des éprouvettes thermo-adhérentes se fait par l'application d'un courant continu intense dans le conducteur du fil pendant une courte durée. Ces éprouvettes sont portées à des températures élevées par effet Joule. Typiquement le temps de chauffage est compris entre 30 et 60 s afin que la couche de base ne subisse aucune dégradation [129].

Une manipulation expérimentale sur ce fil thermo-adhérent de diamètre 0,95 mm a été réalisée pour déterminer un couple courant/temps optimum. Les éprouvettes sont soumises à des courants électriques constants. La résistance électrique des éprouvettes augmente avec la température et, au cours du temps, la tension aux bornes de ces éprouvettes s'accroît donc en conséquence. Sur la figure 3-3, on représente pour trois valeurs de courant (15A, 20A, 25A), l'évolution de la tension continue aux bornes de l'éprouvette en fonction du

temps. Par extrapolation des points de mesure, on peut connaître la tension U_0 aux bornes de l'éprouvette pour un courant donné à l'instant $t=0$ et donc à température ambiante. On veut choisir un couple (temps, courant) pour atteindre une température de collage fixe. Le coefficient de température du cuivre à 0 °C vaut 0.0042 °C⁻¹. A courant constant, l'évolution de la tension en fonction de la température s'écrit :

$$U_t = U_0 + 0,0042.(T_t - T_0).U_0 \quad (3.1)$$

A partir de l'équation (3.1), si on se fixe pour objectif une température de collage (voir les points sur les courbes) pour un courant donné, on va obtenir une valeur de la tension U_t sur chacune des courbes précédentes et l'axe des abscisses nous donne le temps de chauffage nécessaire correspondant. On peut donc extraire un couple courant/temps pour chaque température. Par exemple, pour coller l'éprouvette à 200 °C, on choisit un couple (25A, 48s) car, pour des courants inférieurs (15A ou 20A), la température de 200°C n'est atteinte qu'après des temps dépassant largement la minute.

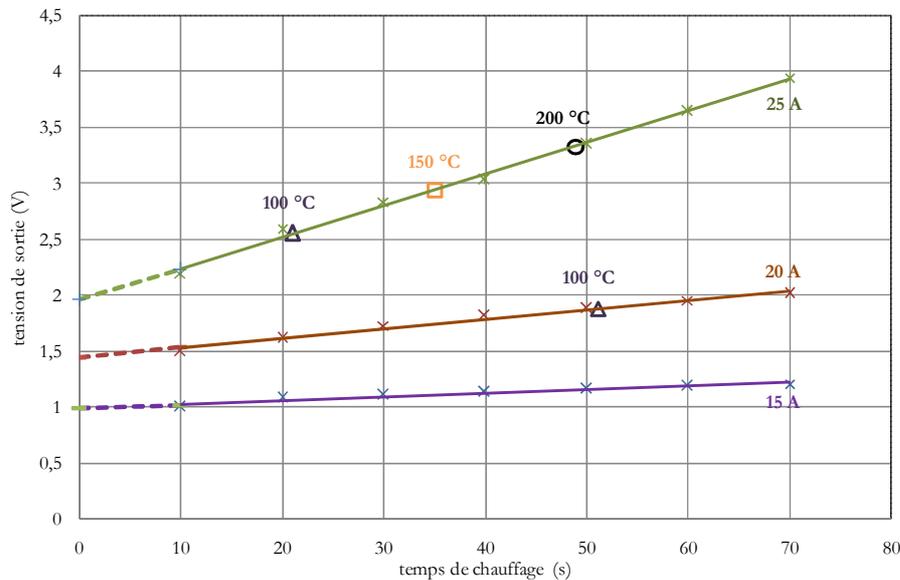


Figure 3-3. Courbes tension-temps (traits) et Températures de collage (points), fil de diamètre 0,95 mm, selon CEI 60851-3

iii. Procédure d'essais

L'éprouvette est placée en position horizontale selon la figure 3-2. L'essai doit être répété à diverses températures. Cela nécessite l'utilisation d'une étuve à ventilation forcée qui doit maintenir la température d'essai dans les limites de $\pm 2^\circ\text{C}$. Le bobinage torsadé est placé sur le support comme le montrent la figure 3-2 en (c). La force de collage de l'éprouvette est déterminée en posant des masses sur le dispositif. L'ensemble est placé dans l'étuve et la température est montée progressivement jusqu'à ce que la rupture de l'éprouvette soit obtenue. Trois éprouvettes identiques sont testées pour chaque température et pour chaque type de fil de manière à obtenir une valeur moyenne. En pratique, il y a eu très peu de dispersion d'une éprouvette à l'autre ; des éprouvettes identiques donnant systématiquement des résultats très voisins en termes de force de rupture.

iv. Résultats d'essais

La figure 3-4 donne la force de collage de chaque type d'éprouvette (imprégnée, thermocollée 20 μm , thermocollée 40 μm , thermocollée 65 μm) en fonction de la température.

Globalement, quelle que soit l'éprouvette, la force de collage diminue en fonction de la température. Les bobines torsadées thermocollées présentent une meilleure force de collage que celles imprégnées par le vernis et

ce, quelle que soit l'épaisseur de la couche thermo-adhérente déposée. Comme prévu, la force de collage d'éprouvettes torsadées thermocollées surdimensionnées (épaisseur d'émail adhésif de 65 µm) est plus élevée que celle des éprouvettes thermocollées avec des couches d'émail au minimum et au maximum de la norme CEI 60317-0-1.

Les éprouvettes torsadées thermocollées de faible épaisseur d'émail donnent des résultats très proches de ceux obtenus avec les éprouvettes thermocollées d'épaisseur d'émail plus importante. Pour une classe F (155°C), la résistance de collage est similaire. La surépaisseur de la couche thermo-adhésive n'est donc pas un facteur déterminant pour les caractéristiques mécaniques.

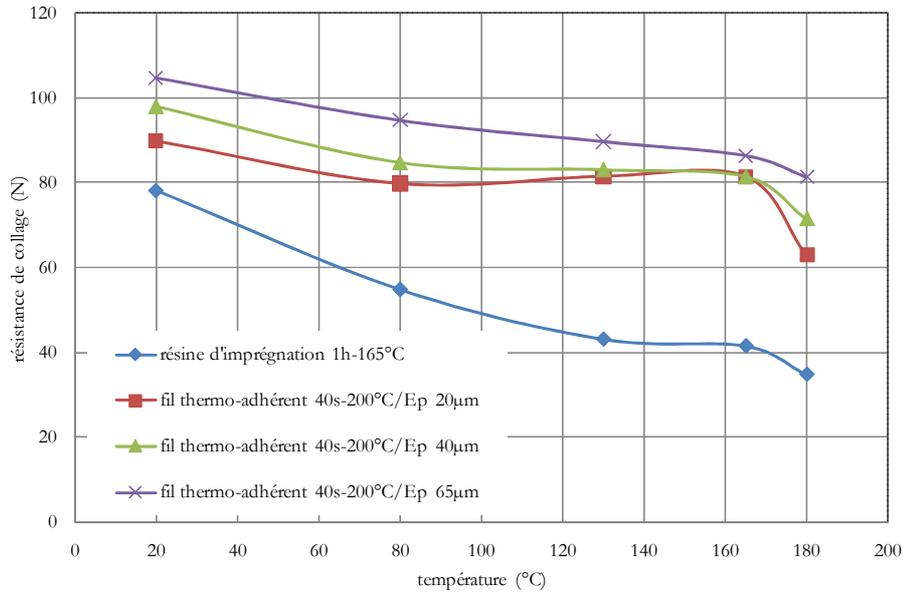


Figure 3-4. Force de collage, Test selon CEI 851-3, Fil 0,95 mm

Au vu de ces essais réalisés, le nouveau fil émaillé sans solvant et thermocollable semble meilleur du point de vue de la force de collage. Cependant, dans un moteur les isolants de fond d'encoche participent également à la cohésion du bobinage. Lorsque l'on utilise du fil thermocollé, ces isolants ne sont plus imprégnés et n'assurent plus aussi bien leur fonction. Donc des prototypes d'isolants de fond d'encoche thermocollants ont été développés suite à cette étude par la société GII pour créer une solution alternative crédible à l'imprégnation.

3.2.3. Test comparatif de performance électrique: décharges partielles

Les systèmes d'isolation électrique (SIE) des moteurs alimentés par convertisseurs statiques sont exposés à des pointes de tension répétées et associées aux fronts de montées très rapides des tensions issues du découpage qui utilise le principe de la modulation de largeur d'impulsion (MLI). La durée de vie peut rapidement être réduite par des processus de vieillissements électriques [131].

Les décharges partielles (DP) sont l'un des mécanismes les plus défavorables aux systèmes d'isolation électriques organiques. Les SIE des moteurs ont été conçus pour fonctionner sans décharges partielles avec des tensions alternatives inférieures au seuil d'apparition des décharges (le terme anglais est "Partial Discharge Inception Voltage" – PDIV). Avec des impulsions à fronts raides, ces conditions d'absence de décharges partielles ne sont généralement plus respectées.

Les phénomènes liés aux décharges partielles, les méthodes de détection et de mesures de décharges ont déjà fait l'objet de nombreuses publications scientifiques. La norme CEI 62068 – 2 présente l'état de l'art de systèmes d'isolation électrique et les contraintes électriques produites par des impulsions de tension appliquées périodiquement. La norme CEI 60270 décrit la décharge partielle qui peut apparaître dans le SIE. L'article [132]

explique les phénomènes physiques qui réduisent la durée de vie du SIE en fonction de l'apparition des DP. Au dessus du PDIV, la durée de vie du SIE est fortement réduite car le nombre de DP est important et l'énergie dissipée localement par ce phénomène est élevée. On peut citer aussi la théorie de Townsend, de Streamer et de Pashen [133] qui expliquent en détail les phénomènes liés à l'ionisation de l'air contenu dans les bulles microscopiques qui subsistent inévitablement au cœur des bobinages.

Dans le cadre de cette thèse, le moteur de référence est considéré, alimenté directement par le réseau. Par conséquent, la problématique de vieillissement de son SIE sous contraintes électriques, et particulièrement les décharges partielles (DP), n'est pas posée. Néanmoins, il est intéressant d'étendre l'étude et de comparer le nouveau SIE sans solvant décrit précédemment à celui du SIE classique du point de vue du seuil d'apparitions de DP afin que ce nouveau SIE soit exploitable sans restrictions. L'étude consiste à mesurer et à comparer le PDIV de deux types d'échantillons de test, les premiers fabriqués par du fil classique avec imprégnation dans des vernis et les autres échantillons fabriqués à base de fil polymérisé par UV et thermocollé.

i. Système de mesure

Les chercheurs du LSEE ont acquis l'expérience de la mesure du PDIV avec une manipulation correspondant à la norme internationale CEI 60270 [134]. Cette manipulation, illustrée par quelques photos dans l'Annexe C, entre dans le cadre de plusieurs thèses menées au sein du laboratoire. Le système considéré permet la mesure du PDIV pour des fréquences relativement élevées et avec une bonne précision, contrairement aux systèmes des mesures du commerce qui sont limités en fréquence et ne permettent pas d'enregistrer le PDIV en fonction d'une valeur imposée d'une charge q de DP.

Le montage du système de mesure, schématisé à la figure 3-5, comprend un circuit d'alimentation, un condensateur de couplage, l'éprouvette en essais, un dispositif de mesure et au final un oscilloscope rapide. Tous les éléments du schéma sont introduits dans une enceinte électrique fermée pour assurer la sécurité électrique et aussi pour diminuer le niveau du bruit électromagnétique.

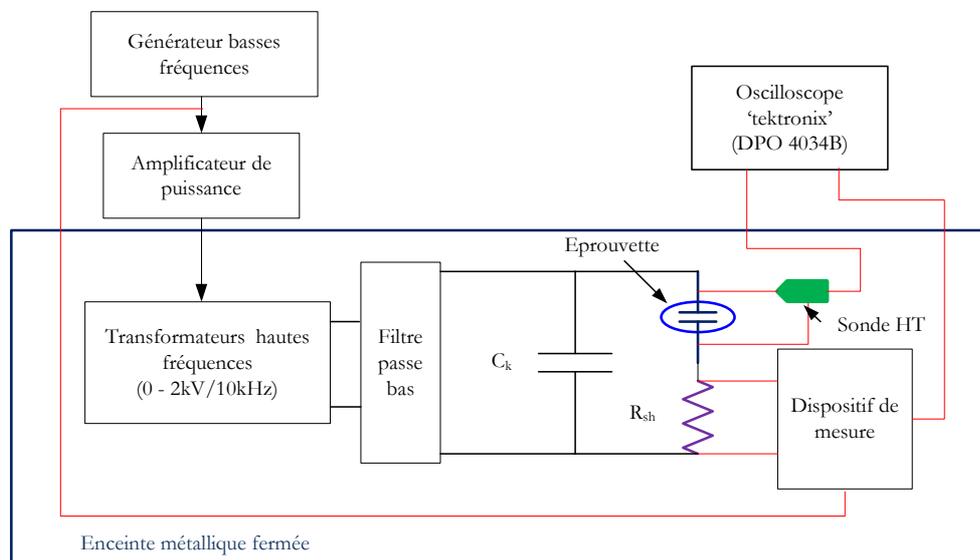


Figure 3-5. Montage du système de mesure du PDIV

Le circuit d'alimentation à 10 kHz est constitué pour sa part d'un GBF, un amplificateur de puissance, de transformateurs et d'un filtre passe bas qui élimine le risque de détecter les éventuelles DP venant du circuit d'alimentation (bobinage de transformateurs). La capacité C_k correspond à la capacité de couplage indiquée dans la norme CEI 60270 ; son rôle est de fermer le circuit pour les courants HF provoqués par les DP, son impédance doit être négligeable par rapport à l'impédance de l'éprouvette en HF. La résistance de shunt (R_{sh}) d'une valeur de $10k\Omega$ sert à la mesure du courant de DP.

La tension mesurée aux bornes de cette résistance inclut deux composantes : la tension sinusoïdale de même fréquence que la tension d'alimentation qui est l'image du courant parcouru par la capacité formée par l'éprouvette, et une composante correspondant au courant des DP. Pour éliminer la composante sinusoïdale, un dispositif de mesure qui se synchronise sur la tension de sortie du GBF est utilisé [135].

Ce dispositif de couplage fait la différence entre la tension mesurée aux bornes de la résistance de shunt et la tension mesurée sur le GBF, adaptée à l'amplitude et à la phase de la composante sinusoïdale de la première. En sortie, il ne passe que le signal issu de la DP qui est mesurée par l'oscilloscope (cf. figure 3-5). La surface de l'impulsion d'une DP est proportionnelle à sa charge apparente q , ce qui permet d'obtenir cette dernière en intégrant le courant de décharge [136]. Par conséquent, le déclenchement de l'oscilloscope se fait sur une DP qui dépasse une tension correspondante, après étalonnage, à 2 pC de charge apparente, bien au dessous de la valeur de 5 pC considéré comme un seuil de bruit acceptable par la norme EN 60034-18-1 [137]. La tension appliquée, correspondant à l'apparition de DP détectée, est bien la tension seuil de décharge partielle (PDIV).

Le GBF permet d'appliquer une tension de commande variable et à une fréquence de mesure (10 kHz). L'oscilloscope a pour rôle de détecter et de visualiser les DP et ainsi de mesurer le PDIV. La figure 3-6 montre la tension appliquée sur une éprouvette en essais et le courant des DP. Les DP se retrouvent dans la portion de l'augmentation de la tension dans l'alternance positive et négative, ce qui coïncide avec la théorie donnée par [138-139].

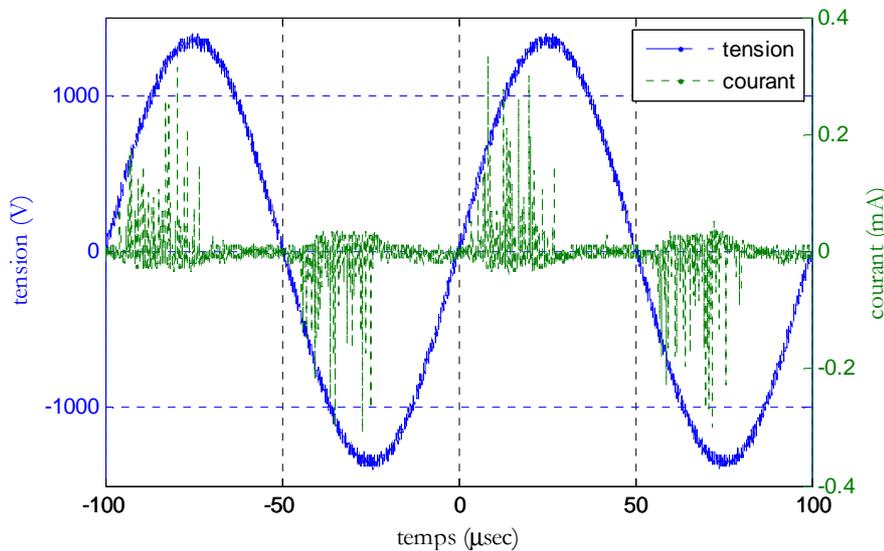


Figure 3-6. Détection et visualisation des décharges partielles d'une éprouvette d'essais (tension largement au dessus du PDIV)

ii. Echantillons d'essais

Les essais de test de décharge partielle sont menés sur deux types d'échantillons d'éprouvettes différentes. Une première éprouvette est constituée d'une paire torsadée normalisée qui est décrite dans la norme CEI 60172 (cf. figure 3-7).



Figure 3-7. Echantillon d'une paire torsadée de fil émaillé selon la norme CEI 60172

Ce type d'éprouvette à 2 fils ne permet pas de reproduire les conditions réelles d'un bobinage imprégné ou thermocollé, notamment les effets au cœur du bobinage. Pour étudier de manière réaliste ce comportement, trois stators ont été définis (cf. figure 3-8) ; ils comportent chacun 24 bobines non connectées. Le premier utilise du fil émaillé standard ; il est imprégné en utilisant la méthode industrielle classique et sert de référence. Le second stator est construit avec du fil thermocollé utilisant la technologie classique d'émaillage. Le troisième est bobiné avec du fil thermocollé polymérisé par UV. Les fils émaillés utilisés ont tous le même diamètre (0,95 mm) et sont de grade équivalent (2B).



Figure 3-8. Stators bobinés avec du fil thermocollé polymérisé par UV (a), avec du fil thermocollé classique (b) et avec du fil imprégné classique (c)

Contrairement aux tests sur des éprouvettes torsadées qui sont parfaitement déterminées. Les essais sur les stators bobinés intègrent l'aspect aléatoire d'un bobinage réel. Ces stators ont été réalisés chez ABMC – Calais par le même technicien avec son savoir faire, il a utilisé le même système d'isolation de fond d'encoche et les mêmes cales de fermeture des encoches. Le stator conventionnel a été imprégné sous vide et sous pression dans leur machine habituelle qui fonctionne tous les jours. Les stators aux bobinages thermo-adhérents sont cuits dans un four à une température de collage de 200°C pendant 2h.

Ces trois stators offrent des possibilités de tests avancés, dont certains sont obligatoirement destructifs, sur un nombre significatif de bobines. En effet, pour chaque stator considéré, une bobine de 40 spires a été repérée avant qu'elle soit coupée au niveau de sa tête afin de choisir les paires de fils à tester. Chaque paire qui va subir les tests est choisie de telle façon que les fils soient les plus proches en utilisant, comme indicateur, la valeur de la capacité d'inter-spire. Cette dernière varie autour de 50 pF pour les échantillons imprégnés, autour de 40 pF pour les échantillons thermo-adhérents classiques avant collage et autour de 35 pF pour les échantillons thermo-adhérents à base du fil UV avant collage.

iii. Résultats d'essais

La première mesure du PDIV relevée à une température ambiante 25 °C sur les éprouvettes torsadées normalisées est donnée à la figure 3-9 pour les trois types d'échantillons considérés. Les résultats indiquent que les échantillons d'éprouvettes imprégnées et fabriquées par le fil classique possèdent un PDIV plus élevé que ceux thermocollés et fabriqués respectivement par le fil polymérisé par UV et le fil classique. Les essais sur éprouvettes torsadées montrent la supériorité de l'imprégnation classique

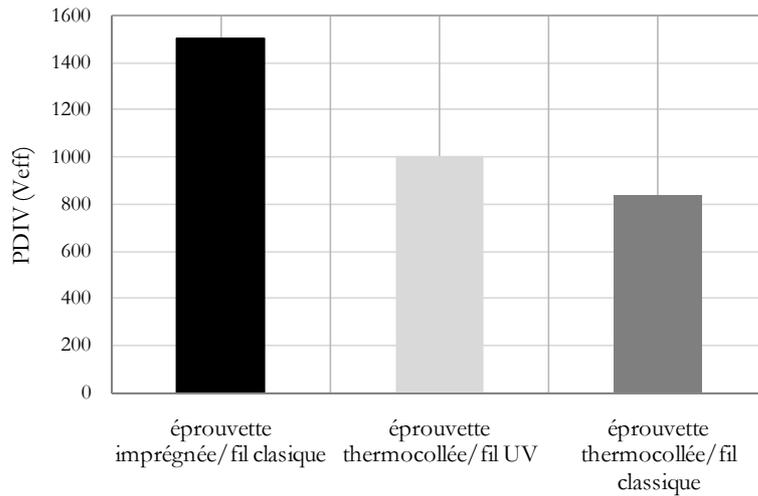


Figure 3-9. PDIV des éprouvettes torsadées relevé à 25°C

Comme précisé précédemment, ces mesures préliminaires faites sur des éprouvettes torsadées ne reflètent pas nécessairement le comportement réel du bobinage d'un moteur. D'autres tests de mesure du PDIV ont donc été menés sur les bobines logées dans des encoches d'un stator présentées précédemment à la figure 3-8. Cette fois - ci la mesure reproduit donc les conditions réelles d'un bobinage statorique. Le PDIV a été relevé sur un lot de 20 paires de fils de la bobine réelle placée dans les encoches de chaque stator considéré. A titre d'exemple, on présente à la figure 3-10 les résultats du PDIV relevé à 25 °C d'échantillons du stator imprégné.

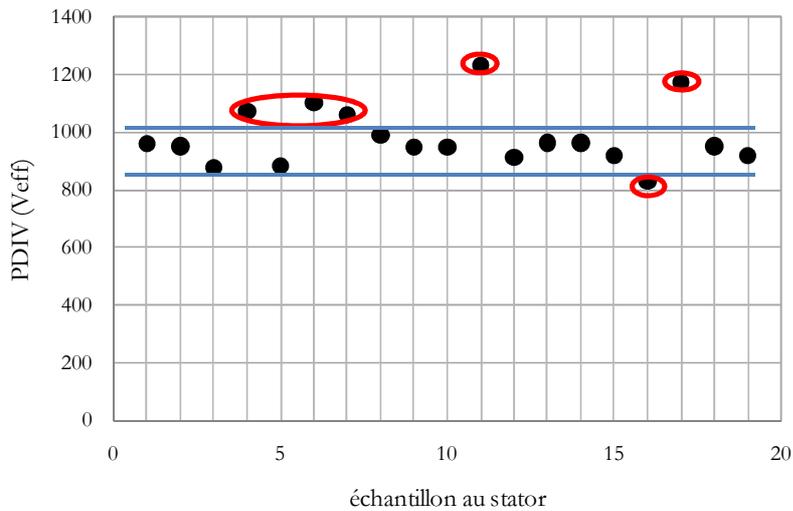


Figure 3-10. PDIV mesuré sur les échantillons du stator imprégné

On peut constater que la plupart des points sont dans la bande 850 – 1000 Volt efficace. Certaines mesures, comme celles qui sont entourés par une ellipse, doivent être éliminées. Elles correspondent à des paires de fils trop éloignés l'un de l'autre dans l'encoche réelle. La mesure du PDIV de chaque type d'échantillon est répétée à des températures élevées (80°C, 120°C, 160°C et 180°C) en excluant les échantillons hors portée. Une valeur moyenne du PDIV est calculée pour chaque température de mesure donnée. Le résultat de mesure est illustré en fonction de la température sur la figure 3-11.

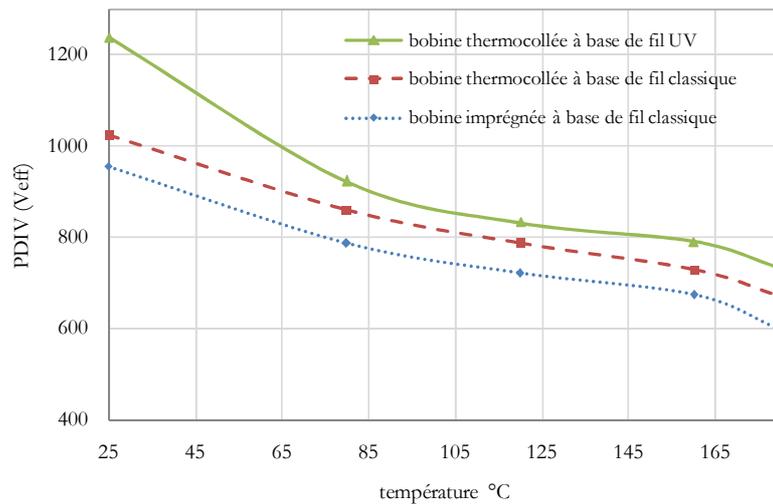


Figure 3-11. PDIV moyen mesuré sur les échantillons statorique en fonction de la température

Dans une situation réelle de bobinage, on remarque que le PDIV diminue en fonction de la température quel que soit le type de la bobine considérée. Le PDIV de la bobine fabriquée à base de fil polymérisé par UV et thermocollé est meilleur que celui de deux autres bobines considérées. A titre d'exemple, on trouve, à une température proche de 155°C qui représente la classe d'isolation de la machine de référence, un écart de 18 % par rapport à la bobine classique imprégnée et 5,7 % par rapport à la bobine classique thermocollée. Quelque soit le fil, classique ou polymérisé par UV, le procédé de thermocollage offre une meilleure tenue aux décharges partielles en comparaison avec le stator imprégné industriellement par la méthode considérée comme la plus performante (vide + pression).

iv. Interprétation de résultats

Les essais réalisés montrent qu'un bobinage thermocollé est meilleur qu'un bobinage imprégné du point de vue de la tenue aux décharges partielles quel que soit la température de fonctionnement. Le bobinage thermo-adhérent à base du nouveau fil polymérisé par UV a de plus une meilleure résistance aux contraintes électriques.

La différence des résultats obtenus sur le PDIV entre bobinage imprégné et thermocollé est liée de toute évidence au procédé de thermocollage lui-même qui permet de recouvrir les spires du bobinage « soudure des spires » lorsque le vernis collant devient thermoplastique à la température de collage. En effet, la colle se diffuse des points de contact entre les fils vers l'extérieur. L'air est repoussé dans des zones de champs électriques plus faibles éloignées des points de contacts qui sont forcément comblés par la colle en polyamide aromatique, celle-ci qui a une permittivité diélectrique relative supérieure à celle de l'air ($\epsilon_r = 4,3$). Lorsque la technique d'imprégnation classique est utilisée, le vernis arrive de l'extérieur et il comble tous les vides du bobinage mais il lui est difficile de pénétrer jusqu'aux points de contact entre les fils. Donc, rien ne garantit que le vernis pénètre partout au cœur du bobinage, même s'il est réalisé sous vide et sous pression, ce qui peut laisser des bulles d'air résiduelles de petites tailles placées aux points de contact entre les spires, donc dans les zones où le champ électrique est le plus intense.

Les simulations numériques (FEMM) dont les résultats sont présentés à la figure 3-12 illustrent ce phénomène pour une tension inter-spires imposée à 1 V ; le but étant de faire une comparaison. Le champ électrique maximum est d'ordre 4 kV/m entre les deux spires thermocollées et d'environ 8 kV/m entre les spires non thermocollées. Le thermocollage a donc un rôle bénéfique en ce qui concerne le seuil d'apparition des décharges partielles, à condition que cette couche soit faite sans réduction des épaisseurs des couches de base, ce qui n'est pas le cas pour la plupart des fils thermocollés du commerce.

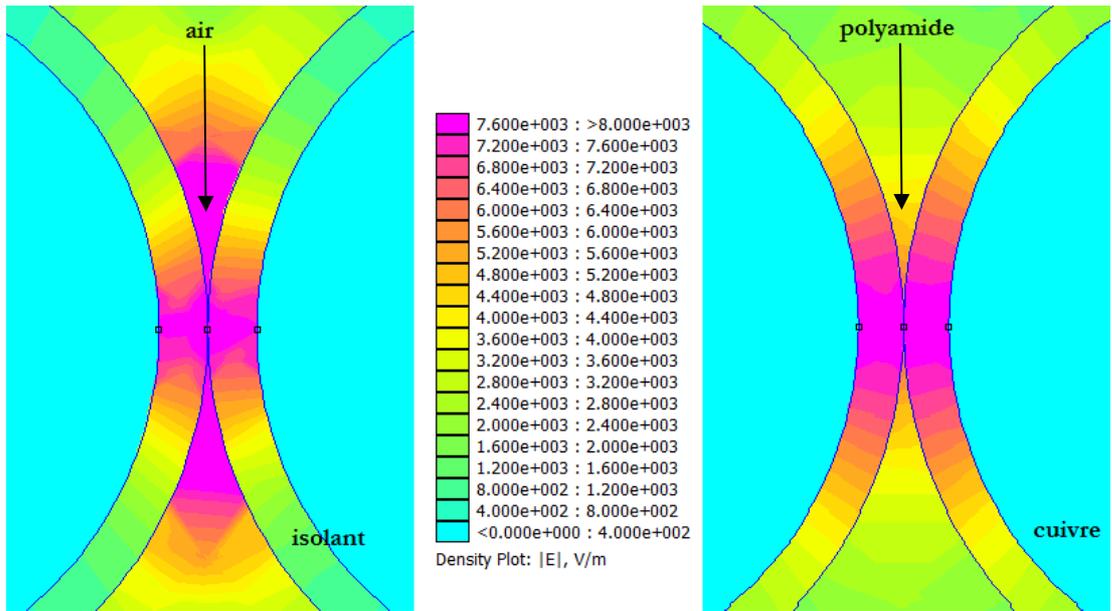


Figure 3-12. Carte du champ électrique entre deux spires d'un bobinage thermocollé (partie droite) et un bobinage non thermocollé (partie gauche) sous une tension 1 V

3.2.4. Evaluation environnementale comparative du bobinage

La production annuelle en Europe de fil émaillé dépasse quand à elle les 500.000 tonnes [140]. Pour un seul moteur, les impacts environnementaux relatifs aux bobinages qu'il contient restent faibles. Cependant, si on met en perspective le demi-million de tonnes de fil consommé, on s'aperçoit que l'enjeu résultant de ce cumul est considérable.

i. Application de l'ACV sur le bobinage électrique

L'analyse comparative qui suit est faite en prenant pour exemple le moteur asynchrone triphasé de 10 kW existant. Le Tableau 3-2 récapitule les différentes données utilisées relatives au bobinage statorique. Cette étude comparative considère le bobinage classique imprégné et le nouveau bobinage thermocollé à base de fil polymérisé par UV.

Tableau 3-2. Données relatives du bobinage classique imprégné et thermocollé à base de fil UV de la machine 10 kW

données	Bobinage classique imprégné	Bobinage thermocollé à base de fil UV
Masse du cuivre	4,3 kg	4,3 kg
Masse de matériau isolant ¹	43,57 g	46,68 g
	65,5 g Solvants	0 Solvants
Énergie d'émaillage finale	1,05 kWh/kg	0,883 kWh/kg
Masse de résine de collage	400 g (vernis)	46 g (thermocolle)
	600 g Solvants	0 Solvants

¹ L'épaisseur d'isolant est la même pour les deux fils mais les masses volumiques sont différentes.

En dehors des valeurs spécifiques d'expertise utilisées dans ce tableau et fournies par GII qui a mis au point le procédé, les autres données utilisées sont celles fournies par la base de données « Ecoinvent », tant sur la phase de conception que sur la phase de fin de vie (pour laquelle nous avons retenu le scénario de déchet standard français qui prévoit une proportion déterminée de matériaux recyclés comme indiqué au chapitre 2).

L'étude réalisée n'est pas l'ACV complète de la vie d'un bobinage de moteur mais bien une étude comparative. Ainsi, beaucoup d'éléments communs au bobinage classique et au nouveau bobinage thermocollé ne sont pas retenus. C'est notamment le cas de tout ce qui a trait au transport et à l'énergie nécessaire à l'étuvage final du moteur (on considère que le procédé de thermocollage sera réalisé par un étuvage similaire à celui de l'imprégnation, la méthode d'application de courant même si elle est plus économique est difficile à mettre en œuvre industriellement)...

Les deux fils auront le même parcours et donc ces éléments auront des impacts équivalents quel que soit le bobinage. Les matériaux servant au revêtement du fil de cuivre pour la confection de fil émaillé sont des isolants spécifiques aux processus de fabrication hautement spécialisés. Ils ne figurent pas encore dans les bases de données qui récapitulent les impacts environnementaux des matériaux plus « grand public ». On a néanmoins modélisé ces différents isolants en procédant par similitude chimique en nous appuyant sur les données relatives aux constituants plus simples qui les composent. Les impacts environnementaux obtenus de cette manière sont évidemment approximatifs et certainement minorés par rapport à la réalité, mais c'est le cas pour les deux solutions car nous négligeons le processus qui transforme ces éléments simples en résines prêtes à l'emploi.

Au final, l'étude prend en compte le cuivre, sa transformation en fil, les quantités de résines constituant les différents isolants, les quantités de solvants utilisées, l'énergie nécessaire à la fabrication du fil émaillé et la fin de vie de tous ces éléments selon un scénario standard français proposé par « Simapro ».

ii. Résultats comparatifs de l'ACV sur le bobinage

La comparaison des impacts environnementaux entre un bobinage imprégné (fil classique) et un bobinage thermo-adhérent (fil polymérisé par UV) d'un moteur électrique de 10 kW est illustrée par la figure 3-13. Les résultats sont représentés en pourcentage de l'impact considéré. Les graphes sont présentés sous forme du radar avec des résultats relatifs ; le point extrême de l'échelle, à 100 %, correspond à l'égalité des coefficients d'impact cumulés pour le critère correspondant à l'échelle.

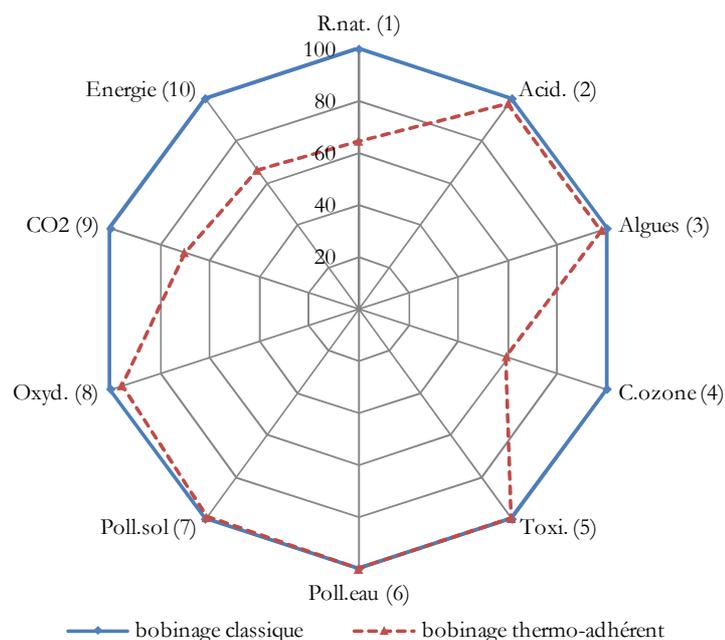


Figure 3-13. Comparaison de 'Bobinage classique imprégné' avec 'Bobinage thermo-adhérent à base du fil UV', cuivre inclus

Le nouveau bobinage (fil polymérisé UV et thermocollé) possède des impacts environnementaux plus faibles que celui du bobinage classique (fil polymérisé par chaleur en phase solvant et imprégné) (cf. figure 3-13) et cette différence reste parfaitement visible même lorsque l'on tient compte du cuivre.

Les gains constatés tiennent pour l'essentiel à l'économie de vernis d'imprégnation et de solvant réalisée dans le cas du thermocollage. En deuxième place vient le gain énergétique lié au nouveau processus d'émaillage. Il convient de noter qu'aucun rejet direct de solvant dans l'atmosphère n'a été pris en compte. Si tel avait été le cas (ce qui existe dans la réalité), les résultats pour le fil classique avec imprégnation auraient été un peu moins bons.

La Figure 3-14 permet de comparer les couches isolantes seule, on retire de la comparaison tous les impacts relatifs au cuivre (la matière, son processus de transformation et sa fin de vie), ne restent donc en présence que les deux techniques d'émaillage et de collage. Le procédé de thermo-adhérence permet de réduire de 65 % les émissions de gaz à effet de serre (GES) et de 70 % la demande d'énergie globale par rapport au procédé classique et avec imprégnation (cf. figure 3-14). Sur tous les autres critères, le nouveau fil et la thermo-adhérence sont également moins impactants.

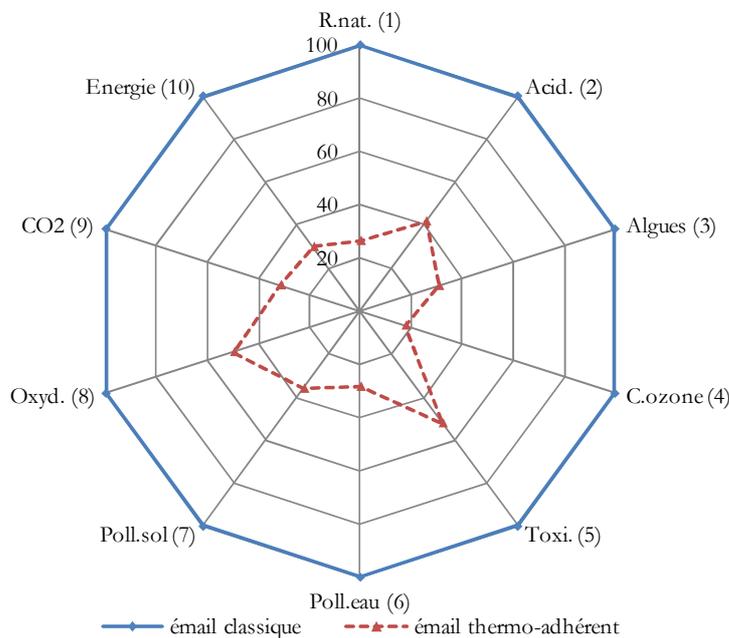


Figure 3-14. Comparaison de 'Email classique d'imprégnation' avec 'Email thermo-adhérent solution UV', cuivre non inclus

Au final, tenant compte des essais et évaluations, le nouveau fil émaillé sans solvant et thermocollable semble meilleur tant du point de vue de la force de collage que de la tenue aux décharges partielles, en plus d'être moins impactant du point de vue environnemental. L'étude détaillée du fil thermo-adhérent classique n'a pas été développée, mais on peut déduire au vu des résultats à la figure 3-14 et par analogie, qu'il reste lui aussi moins impactant que celui du classique et imprégné en considérant l'économie de vernis d'imprégnation, mais moins bon que celui thermocollé à base de nouveau fil UV en considérant le gain d'énergie lié à l'émaillage (1,05 kWh/kg de fil classique et 0,883 kWh/kg de fil UV).

3.3. Structure d'un circuit magnétique plus éco-efficace

Les pertes dans le circuit magnétique représentent une partie relativement importante des pertes totales d'une machine, et dépendent peu de la charge mécanique. L'amélioration de la qualité du circuit magnétique est donc un facteur important d'amélioration de l'efficacité énergétique globale de la machine. Les circuits magnétiques

sont feuilletés pour limiter les courants de Foucault ; dans la grande majorité des cas, des tôles sont à grains non orientés (NO). Les tôles à grains orientés (GO), dont les performances magnétiques sont théoriquement supérieures, ne sont utilisées que dans les transformateurs et les machines tournantes de forte puissance à cause de leur forte anisotropie. En effet, les performances énergétiques des tôles GO sont meilleures uniquement lorsque l'induction magnétique est dans une direction proche de la direction de laminage. Une étude récente [73] a développé une nouvelle structure de circuit magnétique pour les machines électriques tournantes qui permet de bénéficier des bonnes performances des tôles GO en limitant les inconvénients liés à leur anisotropie. Cependant, le processus de fabrication des tôles GO est différent, il est nettement plus complexe que celui des tôles standards NO. La texture des tôles GO nécessite un traitement thermique spécifique qui permet la croissance des grains de GOSS ; ce processus de fabrication nécessite donc plus d'énergie (cf. § 3.3.2 page 103) alors que la quantité de matière est quasiment identique.

Ce travail décrit les résultats d'une comparaison, en termes d'impact environnemental, entre la nouvelle structure du circuit magnétique basée sur un assemblage spécifique de tôles GO composant la couronne statorique d'une machine électrique et la structure conventionnelle NO. L'étude utilise la méthodologie de l'analyse du cycle de vie (ACV) précédemment utilisée. Le logiciel utilisé pour l'extraction des impacts est « Simapro » ; les données génériques sont issues de la base de données « Ecoinvent » et les données spécifiques concernant l'énergie nécessaire à la production des matériaux ont été estimées en collaboration avec un producteur de tôles électriques (cf. Annexe A page 144), les autres composantes matériaux restant identiques par ailleurs. Les résultats permettent de mesurer l'intérêt environnemental de l'utilisation de la nouvelle structure magnétique proposée.

3.3.1. Caractéristiques des circuits magnétiques

Le circuit magnétique est constitué d'un ensemble de tôles découpées, isolées et empilées pour former le circuit magnétique statorique ou rotorique. L'empilement est ensuite pressé, afin de réduire le foisonnement, à une pression minimale de 160 MPa [141]. Cette pression est ensuite maintenue par la carcasse de la machine [142]. Les tôles magnétiques utilisées pour la fabrication des machines électriques sont découpées en une seule pièce si le diamètre extérieur n'est pas trop important, chacune d'elles ayant la forme d'une couronne circulaire. Lorsque le diamètre est trop grand, les tôles sont découpées en segments et sont ensuite empilées et assemblées. La découpe en segments est évitée pour les machines produites en grande série car elle est onéreuse. La principale fonction du circuit magnétique est de canaliser le flux magnétique vers l'entrefer, de maintenir les conducteurs, d'évacuer la chaleur vers les zones froides. Pour cela, le circuit magnétique doit avoir de bonnes caractéristiques thermiques, magnétiques et mécaniques. A ce stade du travail, on s'intéresse à la quantification globale des caractéristiques magnétiques afin de comparer différentes structures de circuit entre elles. Le Tableau 3-3 présente les caractéristiques normalisées des différentes nuances utilisées. On a également indiqué dans ce tableau les notations utilisées dans cette partie du manuscrit pour caractériser les différentes nuances d'acier. Les deux caractères qui suivent le symbole de la tôle représentent l'épaisseur en centièmes de millimètre.

Bien que les chiffres ne soient pas directement comparables, la lecture de Tableau 3-3 montre que les tôles GO ont des pertes plus faibles que les NO même à des inductions plus élevées. Ces deux matériaux ont été choisis pour cette étude car ils sont représentatifs des matériaux employés couramment dans la construction de machines électriques et de transformateurs [143]. Le NO50 est souvent utilisé pour la fabrication de petits transformateurs et de moteurs à haut rendement [144] : ses caractéristiques magnétiques quasi-isotropes font de lui un bon exemple d'acier NO. Le GO35 est un matériau utilisé dans la fabrication de transformateurs à haut rendement ; il est très anisotrope, avec des caractéristiques très intéressantes suivant la direction de laminage.

Tableau 3-3. Nuances d'aciers magnétiques utilisées, Norme EN 10107

Nuance		Epaisseur nominale mm	Pertes magnétiques P_m (50Hz)		Notation associée
			1,7 T	1,5 T	
			W/kg	W/kg	
GO haute qualité	M 125 – 35 P	0,35	1,25	-	HGO35
GO standard	M 140 – 35 S	0,35	1,4	-	CGO35
NO fine	M 235 – 35 A	0,35	-	2,35	NGO35
NO moyenne	M 400 – 50 A	0,50	-	4,00	NGO50
NO standard	M 700 – 65 A	0,65	-	7,00	NGO65

Afin d'étudier plus finement les caractéristiques de ces deux types de tôles magnétiques, des bandes Epstein ont été découpées suivant différentes directions caractérisées par l'angle α formé par le sens de découpe et la direction de laminage. Pour les tôles GO35, 12 valeurs d'angle α allant de 0° à 90° ont été considérées. Pour les tôles NO50, les valeurs de α étudiées ont été 0° , 55° et 90° , ce qui correspond aux directions les plus représentatives. Les essais ont été réalisés avec un cadre Epstein normalisé. Les résultats d'essais sont donnés ci-dessous à la figure 3-15 et à la figure 3-16.

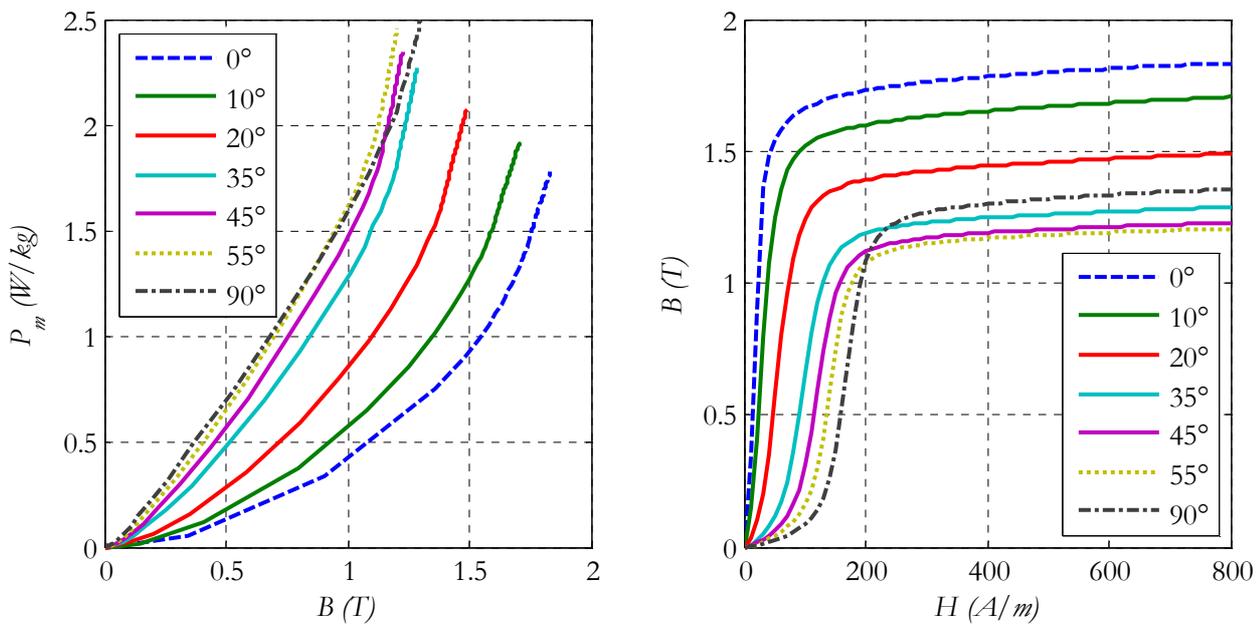


Figure 3-15. Pertes magnétiques en fonction de l'induction et courbes B-H selon différentes valeurs de α relevées à 50 Hz pour les tôles GO35 (Lopez, 2011 - [141])

La figure 3-15, relevée à 50 Hz, présente les courbes des pertes spécifiques P_m exprimées en W/kg en fonction de l'induction B qui est à son tour représentée en fonction de l'excitation H, pour le GO35 à différentes valeurs de α (lors des expérimentations, 12 directions ont été testées mais cette figure ne présente que 7 d'entre elles qui sont suffisamment représentatives).

Cette figure ci-dessus montre la forte anisotropie de ce matériau, la direction 0° donne les meilleures caractéristiques tandis que la direction 55° présente la moins bonne. La direction 90° est proche de la moins bonne. Ceci s'explique par le fait que les arêtes des structures cubiques élémentaires du cristal de fer sont majoritairement orientées suivant la direction de laminage (DL). On trouve dans cette structure une direction (001) à facile aimantation et une direction transversale à difficile aimantation (110). Lors d'aimantations du

monocristal de Fe-Si, la perméabilité relative de l'arête cubique la plus mauvaise est obtenue lorsque le flux circule suivant la direction (111), ce qui correspond à un angle théorique de $54,73^\circ$ par rapport à la direction 0° .

C'est la raison pour laquelle ce type d'acier n'est pas utilisé dans les applications en champ tournant puisque une partie importante de la matière est soumise à des vecteurs champs magnétiques dont la direction est éloignée de la DL où les performances magnétiques sont notablement dégradées. Notons que les caractéristiques relevées pour $\alpha=55^\circ$ et $\alpha=90^\circ$ sont pratiquement confondues pour un $B < 0,9$ T et un $H < 200$ A/m. Au delà de ces valeurs, les performances les plus mauvaises sont selon $\alpha=55^\circ$ (valeur théorique $54,73^\circ$ [141]).

La figure 3-16 présente respectivement les pertes (P_m) en fonction de l'induction (B) et (B) en fonction du champ magnétique (H) pour les tôles NO50 selon différentes valeurs de α . On constate que, contrairement aux tôles GO35, ces matériaux sont presque isotropes avec une légère différence maximale de B entre $\alpha=0^\circ$ et $\alpha=90^\circ$ (pour 1000 A/m) d'environ 0,07 T. Un autre point de comparaison entre les tôles GO35 et NO50, est l'induction au coude de la saturation. Il apparaît clairement que la valeur de l'induction du coude est beaucoup plus élevée, à une excitation d'ordre 200 A/m, pour le GO35 lorsque $\alpha=0^\circ$ (de l'ordre de 1,85T et pour $\alpha=55^\circ$: 1,2 T).

Les caractéristiques magnétiques relevées lors de ces expérimentations permettent de confirmer que l'acier GO35 présente des performances beaucoup plus intéressantes que l'acier NO50 à condition de rester au voisinage de la DL. En effet, les performances énergétiques de tôles GO35 se dégrade énormément en champ unidirectionnel dans les directions qui sont loin de la DL et peuvent devenir pires encore de celles de tôles NO en champ tournant.

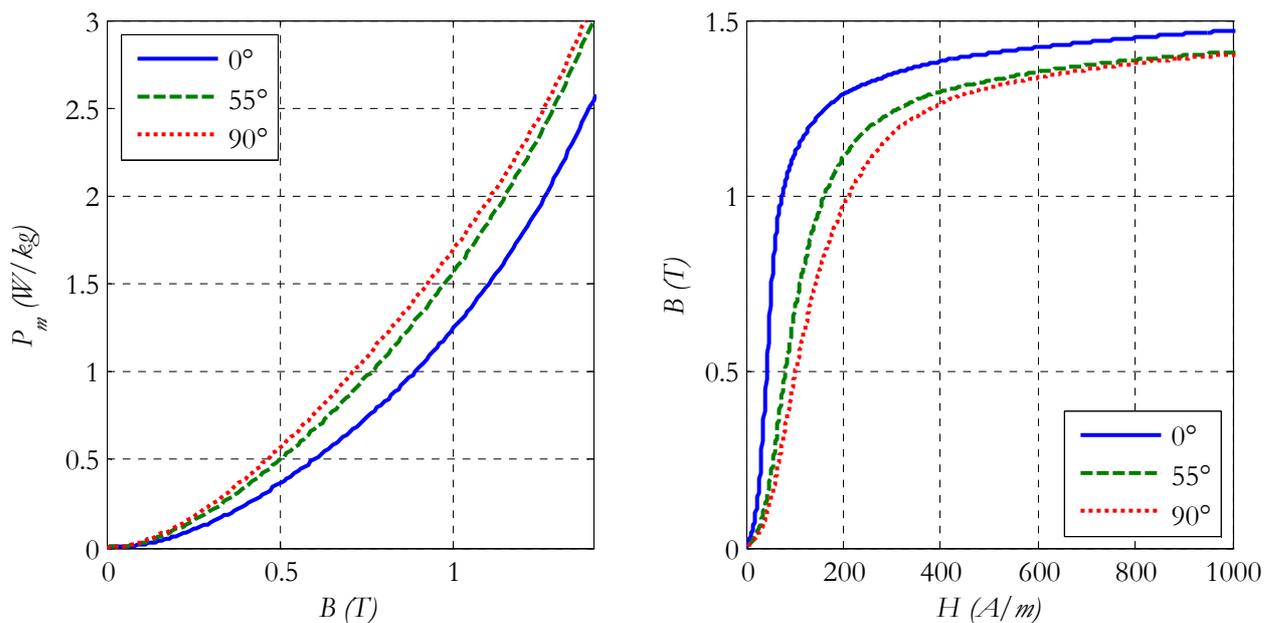


Figure 3-16. Pertes magnétiques en fonction de l'induction et courbes B-H selon différentes valeurs de α relevées à 50 Hz pour les tôles NO50 (Lopez, 2011 - [141])

On voit également que la perméabilité magnétique des tôles GO dans leur partie linéaire et dans leur DL est nettement plus élevée que celle des NO. Dans le contexte des machines tournantes non-segmentées fabriquées avec des tôles GO, le champ se trouve souvent dans des directions autres que la DL, ce qui détériore les performances globales du circuit magnétique.

Une structure innovante a été proposée et optimisée au sein du LSEE [73]. Cette structure est présentée à la figure 3-17. Le principe consiste à décaler les tôles les unes par rapport aux autres d'un angle constant β lors de l'empilage, le long de l'axe z. Ce décalage place la DL de chaque tôle dans un endroit différent du circuit

magnétique, ce qui permet aux lignes de champ de passer d'une tôle à l'autre pour s'aligner sur la DL la plus proche [145]. Plusieurs structures magnétiques ont été réalisées, l'une en NO et les autres en GO avec différents angles pour tester ce principe. Elles ont été testées avec le dispositif de la figure 3-18 appelé « moteur statique » qui comporte un stator encoché et un rotor lisse, permettant de refermer les lignes de champ, séparé du stator par un entrefer de 0,5 mm. Les tôles forment le rotor lisse sont en fait attachées à celles du stator encoché par trois petits plots laissés lors du découpage au laser des encoches et de l'entrefer. Le moteur statique reçoit un bobinage triphasé à 4 pôles comportant peu de spires réalisées manuellement en enfilant les conducteurs dans les encoches.

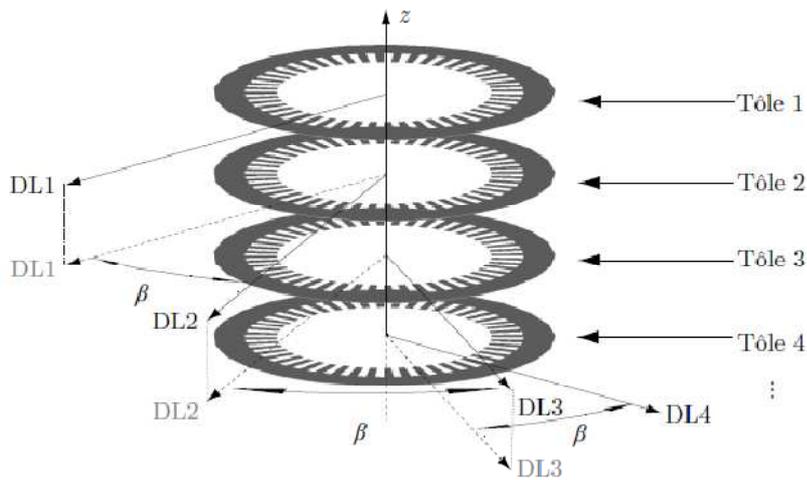


Figure 3-17. Structure de circuit magnétique à base de tôles GO35 décalées d'un angle β (Lopez, 2011 - [141])

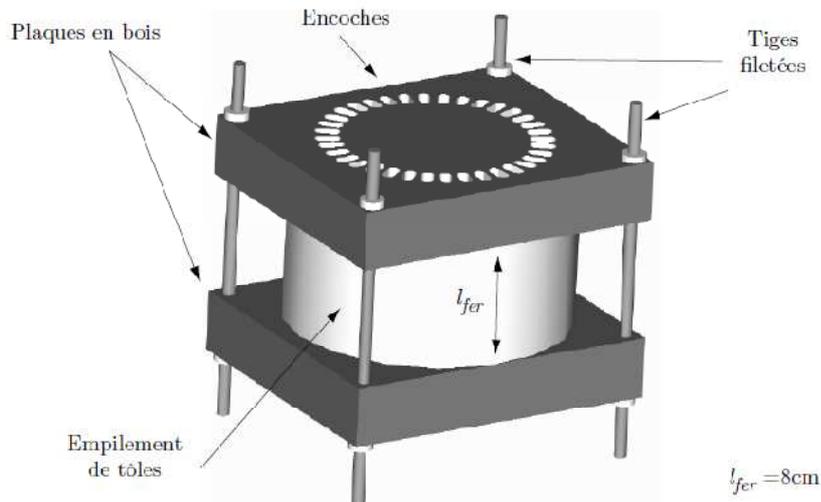


Figure 3-18. Moteur statique (Lopez, 2011 - [141])

La figure 3-19 présente l'évolution des pertes P_m en fonction de l'induction B dans l'entrefer pour plusieurs valeurs de β en présence d'un champ tournant. La configuration NO n'a pas été décalée car le NO50 est un matériau quasiment isotrope. Les circuits magnétiques GO35 avec tôles décalées sont notés GO35/ β . La figure 3-19 montre que la configuration la plus performante est GO35/90°. Les pertes les plus importantes concernent le NO50 et le GO35/00°. Un modèle analytique basé sur la discrétisation en éléments géométriques simples a été

proposé dans [141] afin de mieux analyser les résultats obtenus expérimentalement avec le principe de décalage des tôles.

Ce modèle permet de retrouver les grandeurs globales mesurées lors des essais et d'analyser les phénomènes locaux. Cette nouvelle structure du circuit magnétique décalé GO35/90° permet de réduire les pertes fer de 30 % à 50 % par rapport à la structure conventionnelle NO et donc d'augmenter le rendement du moteur.

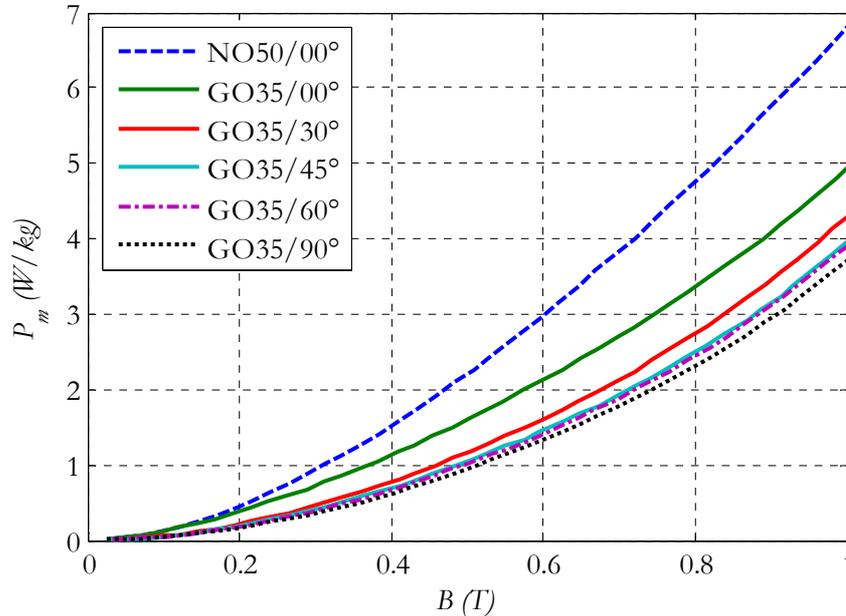


Figure 3-19. Pertes spécifiques pour des différentes configurations testées à 50 Hz sous champ tournant (Lopez, 2011 - [141])

3.3.2. Estimation de surcoût initial du circuit magnétique éco-efficace

La fabrication de l'acier magnétique commence par le traitement du minerai de fer qui est, à l'origine, un oxyde de fer. Le processus de fabrication commence par la réduction de cet oxyde et l'enlèvement ou l'ajout de certains éléments en fonction de l'utilisation finale. La plupart du carbone est enlevé et l'ajout de certains additifs donne des caractéristiques spécifiques au produit fini [143]. L'acier liquide est refroidi puis laminé à chaud pour avoir une bande d'une épaisseur de 2 mm à 4 mm. Le contenu en carbone aura une forte influence sur la dureté et les performances magnétiques finales de l'acier. Il est ensuite laminé à froid à une épaisseur de 0,5 mm ou inférieure; il est alors possible de faire une décarburation grâce à un recuit sous atmosphère contrôlée à 800°C. Le recuit a plusieurs vertus comme la croissance des grains et l'amélioration des caractéristiques magnétiques [146].

Pour résumer, les tôles standard NO passent par deux étapes principales de fabrication. Une première étape s'achève jusqu'à la bobine laminée à chaud avec une épaisseur intermédiaire 2 mm. Cette étape englobe les processus de coulée en continu d'acier, les réchauffements des brames, le laminage à chaud et le cisailage. Une deuxième étape comprend le décapage, le recuit initial et final, les deux processus de laminage à froid. Au final, cette étape se termine par le planage et le revêtement final de tôles [147]. Le Tableau 3-4 résume ces étapes pour les tôles magnétiques à grain non orientés (NO) et à grain orientés (GO).

La base de données « Ecoinvent » propose des données génériques pour la plupart des matériaux et processus courants. La matière d'origine, à savoir une bobine d'origine laminée à chaud de 2 mm d'épaisseur, a été modélisée à partir d'un acier haute qualité auquel on fait subir un laminage à chaud pour le transformer en bobine. En ce qui concerne la fabrication de tôles, le processus standard « Ecoinvent » de laminage de tôles (incluant le décapage, le laminage à froid et le recuit) a été examiné et semble cohérent pour modéliser le processus des tôles NO notamment en termes de quantité énergétique engagée (2,1 MJ par kg de tôles) et de

traitements subis. Grâce aux méthodologies d'agrégation des critères environnementaux, les tôles NO se voient donc associer une valeur d'impact environnemental par unité de masse et ce pour chacun des dix critères retenus.

Pour ce qui relève des traitements plus spécifiques subis par les tôles GO, une analyse plus poussée est nécessaire. Le Tableau 3-4 établi avec notre partenaire métallurgiste compare les traitements subis par les deux types de tôles magnétiques.

Tableau 3-4. Processus de fabrication des tôles magnétiques couramment utilisées dans les machines électriques et transformateurs

Matière d'origine : Bobine laminée à chaud de 2 mm d'épaisseur		
Etape	Tôles NO	Tôles GO
1	Décapage	Décapage
2	1 ^{er} laminage à froid	1 ^{er} laminage à froid
3	Recuit intermédiaire (800°C)	Recuit intermédiaire (950°C)
4	2 ^{er} laminage à froid	2 ^{er} laminage à froid
5	Recuit final (900°C)	Recuit de décarburation (840°C)
6	-	Recuit à haute température (1200°C)

Ce tableau montre que la différence principale, énergétiquement parlant, entre le processus subi par les tôles NO et les tôles GO se situe à l'étape N° 6 dédiée à la croissance des grains de Goss [148] dans les tôles GO. En première approche, il est possible de supposer que le processus de fabrication des tôles GO est similaire au processus des tôles NO à condition d'ajouter à ce processus l'énergie supplémentaire nécessaire au recuit à haute température des tôles GO. On note E (1200°C) l'énergie nécessaire pour augmenter et maintenir la température de tôles à 1200°C, on peut estimer que : $E(1200^\circ\text{C}) = k1 \times k2 \times M \times C \times \Delta T$, avec M , la masse de tôles magnétiques en kg, C la chaleur massique exprimée en J/kg. °C et ΔT est la variation de température en degrés Celsius. $M.C.\Delta T$ représente l'énergie théorique nécessaire à l'élévation en température de l'acier ; $k1$ est un coefficient introduit pour tenir compte de l'énergie nécessaire au maintien en température pendant la durée de recuit. L'isolation du four est ici le paramètre déterminant. Cette étude a retenu $k1 = 1,2$. Le coefficient $k2$ est un coefficient introduit pour prendre en compte la masse du four qui est également chauffée lors de l'opération de recuit. La masse du four représente environ 20 % de la masse d'acier qu'il contient, ce qui donne $k2 = 1,2$.

Il en résulte que le processus de fabrication des tôles GO introduit, par rapport au processus de fabrication de tôles NO, une surconsommation énergétique de : $E(1200^\circ\text{C}) / \text{kg de tôles} = 1,2 \times 1,2 \times 500 \times (1200 - 20) = 0,85$ MJ, soit 40 % environ de coût énergétique supplémentaire pour les nouvelles tôles. Cette surconsommation se traduira par des valeurs d'impacts environnementaux majorés, ce qui rend ces tôles a priori moins bonnes du point de vue environnemental.

3.3.3. Evaluation environnementale comparative de circuits magnétiques

Les structures conventionnelles de circuits magnétiques des machines tournantes à courant alternatif utilisant des tôles électriques NO d'épaisseur 0,65 mm sont à l'origine des pertes énergétiques lors de la phase d'usage. Considérons la machine de référence triphasée, à 4 pôles, à cage d'écureuil et alimentée directement par le réseau triphasé équilibré. Rappelons que les valeurs nominales associées sont 10 kW – 400 V – 50 Hz – 21 A – 1440 tr/min – $\cos\varphi = 0,81$. Cette machine expérimentale, comme il est indiqué dans le chapitre précédent au paragraphe (2.3.3.ii) page 46, fonctionne en régime nominal et est très proche de la saturation (l'induction dans l'entrefer vaut 1T).

La nouvelle structure de circuit magnétique utilisant des tôles GO décalés 90° appliquée à cette machine de référence implique une réduction de pertes fer minima d'environ 30 % (cf. figure 3-19) en considérant que les pertes fer rotorique sont inchangées pour les machines électriques tournantes. Sur la machine de référence, les pertes fer représentent 20 % de pertes totales, ce qui implique, d'après un calcul grossier par l'équation (3.2) et

qui est affiné plus loin dans le manuscrit, une amélioration prévisible du rendement minima de 0,64 point au régime nominal. On considère un rendement nominal de 87,2 % pour la machine de référence.

$$\eta' = \frac{1}{1 + (1 - 0,3 \times 0,2) \cdot \left(\frac{1 - \eta}{\eta} \right)} \quad (3.2)$$

L'efficacité énergétique est un paramètre de toute évidence essentiel pour l'amélioration de l'écobilan global d'une machine électrique fonctionnant en service continu sur un temps de travail long [15]. Cependant, l'amélioration de performances de la machine dans la phase d'usage doit compenser le coût environnemental additionnel de la phase de construction. Par conséquent, chaque changement effectué pour améliorer l'efficacité doit systématiquement être vérifié par une analyse environnementale complète de type ACV.

D'après l'estimation précédente, la nouvelle structure GO35/90° du circuit magnétique implique environ 40 % d'impacts supplémentaire sur son dernier processus de fabrication. Par contre, elle produit donc une augmentation du rendement minima d'environ 0,64 %. Cette section présente un écobilan global énergétique comparatif de deux machines électriques utilisant respectivement un circuit magnétique conventionnel NO et un circuit magnétique GO35/90°. L'écobilan comparatif ne prend en compte que, pour la phase de fabrication, les impacts liés à l'acier des tôles et à leur processus de réalisation et, pour la phase d'usage, les pertes électriques du moteur au cours de sa vie, la phase de fin de vie reste inchangée avec un recyclage à 45 % d'après le scénario français standard [81].

Le Tableau 3-5 affiche les différences en pourcentage par rapport à la machine de référence des impacts environnementaux relatifs au cycle de vie donné (2000h et 20000h). Ces impacts sont liés à la phase de construction qui considère toujours une électricité mixte européenne, d'une part et à la phase d'usage d'autre part selon les dix critères d'impact retenus par la méthode d'évaluation. Durant l'usage, l'électricité consommée est d'origine française et deux types de fonctionnement normalisés (CEI 60034-1) sont considérés ; le service continu S1 avec 20000 heures de temps cumulé et le service intermittent S3 avec 2000 heures de temps cumulé. La référence (100 %) correspond à la machine de référence utilisant des tôles NO. L'amélioration de la phase d'usage, due à l'accroissement du rendement de la machine utilisant des tôles GO35/90°, entraîne une amélioration comprise entre 0,77 % et 4,2 % de l'écobilan selon les critères d'impact (pour un usage standard de 20000 heures). A contrario, l'utilisation de cette nouvelle structure détériore la phase de construction de 0,1 % à 0,7 % selon les critères concernés.

3.3 Structure d'un circuit magnétique plus éco-efficace

Tableau 3-5. Impact environnemental global de l'utilisation de tôles GO décalées dans une machine 10 kW

N°	Indicateur d'impact	Unité	Variation de l'impact lié à la fabrication de tôles GO35/90°	Variation de l'impact lié à l'usage de tôles GO35/90°	
				Usage 20.000 h	Usage 2000 h
1	Epuisement des ressources naturelles	kg Sb eq	+0,4 %	-3,78 %	- 1,87 %
2	Acidification	kg SO2 eq	+0,2 %	-2,50 %	-0,53 %
3	Eutrophisation	kg PO4 eq	+0,6 %	-3,80 %	-1,94 %
4	Appauvrissement de la couche d'ozone	kg FC11 eq	+0,4 %	-2,51 %	-0,53 %
5	Toxicité humaine	kg 1,4 DB eq	+0,1 %	-3,33 %	- 1,12 %
6	Ecotoxicité de milieu terrestre	kg 1,4 DB eq	+0,7 %	-0,77 %	-0,09 %
7	Ecotoxicité de milieu aquatique	kg 1,4 DB eq	+0,1 %	-4,20 %	-3,70 %
8	Oxydation photochimique	kg C2H4	+0,3 %	-2,38 %	-0,48 %
9	Emissions des gaz à effet de serre	kg CO2 eq	+0,4 %	-3,83 %	-2,00 %
10	Energie cumulative consommée	MJ	+0,1 %	-4,20 %	-3,73 %

La figure 3-20 montre le résultat de la comparaison globale, selon les dix critères d'impact, d'une machine NO classique et d'une machine GO35/90° sous forme du radar qui donne une vue globale.

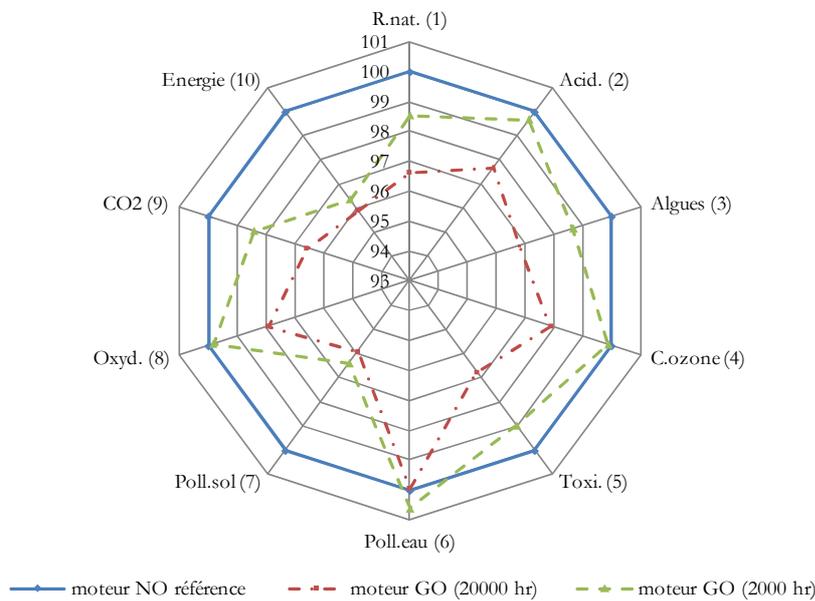


Figure 3-20. Différence en pourcentage des impacts environnementaux globaux de la machine 10 kW selon les critères d'impact

Malgré leur processus de fabrication énergivore, les tôles GO avec leur mise en œuvre décalée restent la meilleure solution selon tous les critères pour une machine fonctionnement en service continu de 20000 heures car l'amélioration d'efficacité dans la phase d'usage compense le surcoût environnemental de fabrication. Le gain le plus significatif est obtenu sur le critère de la demande d'énergie (critère 10) et le critère d'écotoxicité terrestre (critère 7) qui sont liés directement ou indirectement aux pertes énergétiques lors de la phase d'usage. Le critère de pollution d'eau (critère 6), est comparativement très peu affecté car ce dernier est essentiellement influencé

par le taux de recyclage de métaux dans la phase de la fin de vie, la conception et l'usage n'ayant que très peu d'influence.

Il est intéressant de regarder l'évolution des impacts relatifs lorsque le temps d'usage du moteur diminue. Lorsque le moteur ne fonctionne plus en mode continu mais à hauteur d'un dixième de ce temps (2000 heures), on voit que l'intérêt des tôles GO décalées est moins net pour certains critères (2, 4, 5 et 8) et même légèrement négatif pour le critère 6. En effet, ces critères sont fortement liés à la phase de construction. La marge en faveur des tôles décalées reste néanmoins très favorable puisqu'il faut un temps de fonctionnement de 2000 heures pour voir les courbes se rejoindre pour les premiers critères.

Pour conclure, les phases de construction et d'usage de chaque structure ont été modélisées afin d'estimer les impacts liés à chaque phase. Au final, un écobilan global comparatif a été réalisé afin de déduire les bénéfices totaux liés à l'utilisation de la nouvelle structure GO du circuit magnétique. La nouvelle structure est meilleure du point de vue environnemental pour les machines qui ont un temps cumulé de fonctionnement assez long. L'avantage de cette amélioration de partie active est quelle ne change pas la masse du moteur, contrairement à l'expérience du chapitre 2 page 79. Cette étude montre la contribution de l'outil ACV à la décision lors de la conception des machines et d'éviter d'éventuels transferts de pollution d'une phase de vie à une autre.

3.4. Composants en plastique issus de bio-polymères

Comme il est indiqué dans le chapitre précédent (cf. paragraphe 2.5.3.ii page 81), la machine électrique est constituée de certains composants inactifs tels que le ventilateur et son capot, la plaque à bornes et son boîtier, où le plastique semble le matériau le plus adapté pour construire ces composants car il est moins énergivore lors de la phase de fabrication. A l'heure actuelle, de nombreuses sociétés et laboratoires de chimie cherchent à développer des bioplastiques fabriqués sans pétrole et moins impactants. A ce stade, on propose donc de remplacer les plastiques classiques issus de la pétrochimie par des matériaux nouveaux issus de la chimie verte.

Une description générale de bio-polymères utilisés dans la fabrication de plastiques est réalisée. Trois types de bio-polymères sont proposés à titre d'exemple, leurs différentes caractéristiques sont comparées à celles du polymère déjà utilisé dans le moteur de référence. Des échantillons de ventilateurs à base de bio-polymère ont été réalisés. En conclusion on discutera du gain environnemental attendu.

3.4.1. Description des bio-polymères

Les bio-polymères sont un sous-ensemble de polymères qui sont issus d'organismes vivants ou de polymères synthétiques obtenus à partir de ressources renouvelables. Deux principaux types de bio-polymères existent : le premier type est synthétisé directement par un organisme vivant, comme par exemple, les familles des polysaccharides (la cellulose, l'amidon, la chitine, etc.), des protéines (la caséine, le gluten de blé, le collagène, etc.) et des polynucléotides (ADN : acide désoxyribonucléique et ARN : acide ribonucléique). Le second type est produit par réaction chimique à partir de réactifs biologiques synthétiques comme les polyesters synthétisés à partir d'huiles naturelles ou les polyesters microbiens. Certains polymères peuvent servir de substituts directs pour d'autres polymères [149]. En résumé, les bio-polymères sont tout simplement des polymères qui dérivent d'une source biologique.

Les bioplastiques sont des plastiques fabriqués à partir de bio-polymères. Ils peuvent être faits en utilisant des plantes, des animaux, ou des sources bactériennes. Certains bioplastiques sont biodégradables (c.-à-d. ils se dégradent rapidement dans la nature) tandis que d'autres ne le sont pas, ce qui permet d'utiliser certains bio-polymères pour des produits, à longue durée de vie, qui doivent être résistants et ne pas se dégrader rapidement dans l'environnement [150]. Le champ des bioplastiques est encore à ses débuts, mais il se développe rapidement [151]. A titre d'exemple, l'amidon et la cellulose, qui sont les polymères végétaux les plus courants, sont retenus pour la suite de notre étude dont on décrit les propriétés en détail.

L'amidon est un polymère que l'on rencontre dans des végétaux, principalement dans les organes de réserve des plantes (pommes de terre, céréales, pois...). La principale propriété de l'amidon, lorsque celui-ci est conditionné sous forme de film, est sa faible perméabilité et sa dégradation aisée en présence de micro-organismes [152]. Un traitement chimique permet de rendre l'amidon résistant à un cisaillement thermomécanique, car la stabilité de ce polymère sous contrainte n'est pas très élevée. Quand l'amidon est extrudé, le matériau est transformé en thermoplastique. L'utilisation de plastifiants est recommandée pour diminuer les interactions intermoléculaires et stabiliser les propriétés du produit. En raison du caractère hydrophile de l'amidon, les performances des matériaux extrudés varient pendant et après la transformation en fonction des proportions d'eau. Les mélanges avec des polymères hydrophobes produisent des formulations acceptables pour la mise en œuvre de pièces, par injection/moulage ou sous forme de films. Des additifs peuvent être ajoutés pour faciliter les mélanges ou le laminage.

La cellulose, polymère structural naturel le plus abondant sur terre, est quant à elle un homopolymère cristallin qui ne diffère des autres polysaccharides que, par sa très longue chaîne, d'un degré de polymérisation moyen. Sa composition chimique est semblable à celle de l'amidon. Les rubans de cellulose peuvent ensuite interagir entre eux pour former des réseaux gigantesques. La cellulose peut être biodégradée par une large variété de micro-organismes. Elle est familièrement rencontrée sous forme de papier ou de carton dans le contexte de l'emballage.

3.4.2. Caractéristiques comparatives de bio-polymères

Rappelons que l'objectif de l'étude est de remplacer les composants plastiques du moteur par des matériaux biosourcés non biodégradables, hydrophobes, ayant des caractéristiques mécaniques, thermiques et électriques voisines de celles des polymères pétroliers actuellement utilisés. Le ventilateur du moteur de référence a fait l'objet d'une expertise par l'Unité de Chimie et Catalyse de Solide (UCCS) de manière à confirmer le type de matériau utilisé. La caractérisation par spectroscopie Infra-Rouge à Transformée de Fourier montre que le polymère utilisé dans le ventilateur existant est bien du polypropylène. Ce produit pétrolifère est donc considéré comme référence de comparaison.

Trois bio-polymères déjà industrialisés sont proposés pour remplacer le polypropylène : l'acétate de cellulose et l'acétate butyrate de cellulose vendu par Goodfellow et le Gaïalene proposé par la société Roquette. L'acétate de cellulose est une matière plastique d'origine végétale à base de cellulose ; il dérive du celluloïd dont il a les principales propriétés, mais il est moins inflammable et conserve mieux sa transparence et ses couleurs. L'acétate butyrate de cellulose est aussi une matière plastique dérivée de la cellulose. Il se prépare de manière similaire à l'acétate de cellulose, mais sa fabrication utilise, en plus, un mélange d'anhydride et d'acide butyrique.

Le Gaïalene est fabriqué à partir d'un produit issu de ressources agricoles renouvelables, l'amidon, à hauteur de 55% et à hauteur de 45 % d'éthylène, lequel peut avoir une origine pétrolifère ou être produit à base de végétaux, il sert généralement à fabriquer des films par extrusion, ou des corps creux par injection. Les différentes caractéristiques (mécaniques, thermiques, électriques...) issues de document technique, de bio-polymères retenus ont été comparés, dans le Tableau 3-6, à celles du polymère de référence le polypropylène. Pour des raisons de confidentialité exigée par Roquette, les caractéristiques du produit « Gaïalene » ne sont pas incluses dans ce tableau.

Tableau 3-6. Caractéristiques comparatives des polymères [Goodfellow]

	<i>Caractéristiques</i>	<i>Polypropylène</i>	<i>Acétate de cellulose</i>	<i>Acétate butyrate de cellulose</i>
<i>Mécaniques</i>	Dureté – Rockwell	80 – 100	34 – 125	99
	Module de tension (GPa)	0,9 – 1,5	1,0 – 4,0	0,3 – 2,0
	Résistance à la traction (MPa)	25 – 40	12 – 110	20 – 60
	Résistance aux chocs - IZOD (J m ⁻¹)	20 – 100	100 – 450	260
<i>Physiques</i>	Absorption d'eau - équilibre (%)	0,03	1,9 – 7,0	0,9 – 2,2
	Densité (g cm ⁻³)	0,9	1,3	1,2
	Indice de réfraction	1,49	1,49	1,748
	Indice limite d'oxygène (%)	18	19	17
	Inflammabilité	HB	HB	HB
<i>Thermiques</i>	Coefficient d'expansion thermique (x10 ⁻⁶ K ⁻¹)	100 – 180	80 – 180	140
	Conductivité thermique à 23C (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0,1 – 0,22	0,16 – 0,36	0,16 – 0,32
	Temp. de déflexion à la chaleur – 0,45 MPa (C)	100 – 105	52 – 105	73
	Temp. de déflexion à la chaleur – 1,8 MPa (C)	60 – 65	48 – 86	62
	Temp. maximale d'exploitation (C)	90 – 120	55 – 95	60 – 100
<i>Electriques</i>	Constantes diélectriques à 1 MHz	2,2 – 2,6	~5	2,5 – 6,2
	Facteur de dissipation à 1 MHz	0,0003 – 0,0005	0,06	0,04
	Résistance diélectrique (kV mm ⁻¹)	30 – 40	11	10
	Résistivité volumique (Ohm.cm)	10 ¹⁶ – 10 ¹⁸	5x10 ¹²	10 ¹¹ – 10 ¹⁵

On remarque, à partir du tableau ci-dessus, que l'acétate de cellulose et l'acétate butyrate de cellulose ont, du point de vue mécanique, des propriétés proches à celles du polypropylène (résistance aux chocs même meilleure à la faveur de produits biosourcés). Du point de vue physique, l'acétate de cellulose possède un pourcentage d'absorption d'eau élevé par rapport aux deux autres polymères, tandis que celui de l'acétate butyrate de cellulose reste relativement proche du produit d'origine. L'indice d'inflammabilité reste similaire pour les trois produits comparés.

On peut constater aussi que ces polymères ont presque les mêmes comportements thermiques du point de vue dilatation et conductivité. En ce qui concerne la température maximale d'exploitation, on retrouve une plage de fonctionnement commune entre 90°C et 100 °C pour les trois polymères. Les produits biosourcés possèdent une tension de claquage légèrement inférieure à celle du produit d'origine mais il y a toujours une marge de sécurité largement élevée par rapport à la tension appliquée au moteur. Le produit Gaïalene n'apparaît pas ici mais présente les caractéristiques qui permettent de le garder comme produit à tester.

3.4.3. Réalisation des échantillons à base bio-polymère

Le ventilateur du moteur électrique est la pièce en plastique la plus sensible et délicate à concevoir, c'est donc cette pièce qui a été retenue pour tester la faisabilité de l'introduction de pièces en bioplastique dans un moteur. Un moule qui pèse 270 kg a été réalisé en faisant appel à un sous-traitant « Ovadesign » à Paris et l'injection de la matière a été effectuée au lycée de plasturgie d'Auchel (cf. figure 3-21).

Au final, après essais d'injection des différentes matières proposées précédemment, on a obtenu trois types d'échantillons de ventilateur. Le premier est fabriqué à base de polypropylène (témoin) ; le deuxième est fabriqué à base d'acétate butyrate de cellulose et le troisième est injecté à base de Gaïalene (Roquette) (cf. figure 3-22). L'acétate de cellulose a été finalement rejeté au stade des essais de réalisation en raison de son hygroscopie. La présence d'humidité le faisant trop gonfler et ramollir pour qu'il soit envisageable de l'utiliser.



Figure 3-21. Moule & machine d'injection de la matière plastique au lycée plasturgie à Auchel (62)

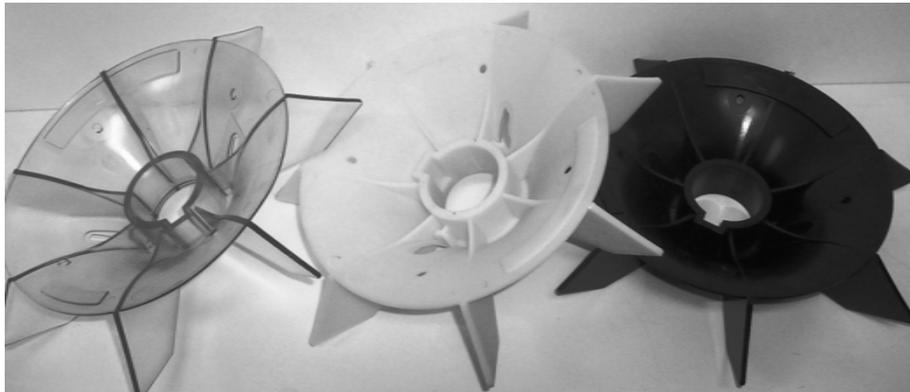


Figure 3-22. Trois échantillons de ventilateurs fabriqués à base de polypropylène (noir), de Gaïalène (jaune) et d'acétate butyrate de cellulose (transparent)

Du point de vue environnemental, un plastique biosourcé est, en théorie, moins impactant qu'un produit pétrolier. Les bioplastiques ont un bilan de CO₂ neutre sur leur cycle de vie, ils sont valorisables en tant qu'éléments végétaux en fin de vie. De plus ils sont potentiellement produits avec des cultures locales qui diminuent l'impact du transport.

Ces considérations ne sont toute fois pas forcément vérifiables, à ce jour, car ils sont fabriqués et utilisés à une échelle infinitésimale comparée aux plastiques pétroliers. Les filières d'approvisionnement et les infrastructures de production n'en sont qu'au balbutiement et, même s'il n'y a pas d'évaluation environnementale proprement dite, sont donc certainement moins optimisées. Quant à la filière de traitement des déchets en fin de vie, elle n'existe pas encore, ce qui empêche la valorisation pourtant aisée de ces produits. Ce sont toutefois des aléas conjoncturels qui se régleront si l'utilisation de produits biosourcés s'accroît.

3.5. Roulements éco-énergétiques

Les pertes mécaniques dans une machine électrique représentent environ 5 % de pertes totales. Les pertes par frottements dans les roulements de l'arbre du rotor représentent une part importante de ce type de pertes. Le

fabricant de roulements SKF propose un nouveau roulement éco-énergétique à billes (série E2) destiné à des applications de mécanique soumises à des charges modérées et permettant une réduction importante des pertes énergétiques liées aux frottements entre les parties mobiles du roulement. En effet, la cage de séparation des billes, réalisée en polymère, a fait l'objet d'une nouvelle géométrie qui optimise le rôle du lubrifiant tout en réduisant la déformation de la cage à haute vitesse et les frottements qui en découlent [153].

Une nouvelle graisse a aussi été mise au point, afin d'offrir une grande fluidité pour réduire le moment de frottement tout en garantissant une protection efficace contre l'usure à température élevée. Il s'agit d'un lubrifiant de synthèse au lithium à très faible coefficient de frottement, développé spécifiquement pour le roulement éco-énergétique. Ce lubrifiant est intégré à vie dans le roulement, dans un volume spécifiquement étudié pour faciliter sa circulation, ce qui contribue à diminuer les frictions et permettre la réduction de la température de fonctionnement. D'autre part, la géométrie des bagues a subi une optimisation afin d'obtenir une qualité de roulage des billes optimale et, là aussi, de limiter les pertes par frottements.

D'après SKF, la réduction de frottement constatée sur le banc de test varie entre 30 et 50 % (cf. figure 3-23). Il en résulte une baisse notable de la température de fonctionnement qui autorise un accroissement de 15 % de la vitesse maximale de fonctionnement. A vitesse constante, c'est la durée de vie du roulement qui est doublée, comparativement à un roulement standard. Le gain énergétique durant un an de l'utilisation de ce type de roulements éco-énergétiques dans une machine électrique de 37 kW tournant 3000 tr/min, est de 140 kWh et 46000 g de CO₂ [153]. En considérant une durée de vie moyenne du moteur de 10 ans, l'utilisateur final gagne entre 500 % et 900 % de l'investissement initial que représente le coût du roulement.

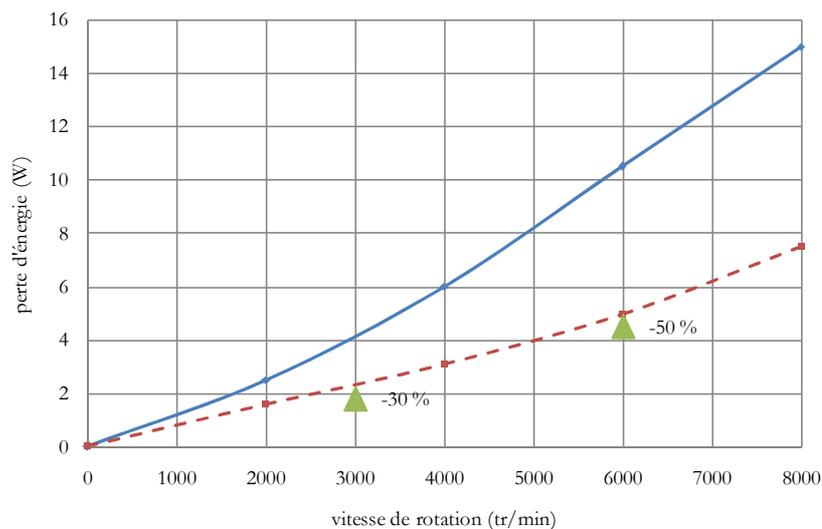


Figure 3-23. Pertes en fonction de la vitesse de rotation de roulements standards (trait continu) et éco-énergétiques (trait pointillé), les marqueurs indiquent la différence de perte d'énergie (SKF, [75])

Il est à noter qu'une étude d'ACV complète sur ce type de roulements prenant en compte toute les phases de cycle de vie n'a pas été réalisée compte tenu du manque de données nécessaires sur les opérations de fabrication. SKF s'est engagé à réduire de 5 % chaque année les émissions de CO₂ liées à ses opérations de fabrication mais on ne dispose que de cette intention.

Cependant la quantité de matière ne change pas notablement, si l'on suppose que ce sont les processus d'usinage qui sont complexifiés, alors l'énergie liée aux usinages restent faible au regard de celle de la fabrication des pièces brutes en fonderie. Par conséquent, on présume que l'utilisation de roulements de bonnes performances énergétiques permet d'améliorer l'écobilan de la machine fonctionnant à longue durée.

3.6. Conclusion

Ce chapitre présente diverses améliorations éco-énergétiques que nous proposons d'intégrer à la conception de la machine électrique de référence afin de réduire les impacts environnementaux produits par cette machine durant son cycle de vie total. Deux nouvelles solutions technologiques ont été décrites, testées et validées à l'aide de l'outil ACV afin de les implémenter dans la conception d'une nouvelle machine.

Une première solution, définie en collaboration étroite avec deux partenaires industriels ACEBSA, fabricant du fil émaillé et GII, spécialiste du vernis polymérisé par UV, s'intéresse à un nouveau bobinage thermocollé et fabriqué à base d'un fil émaillé polymérisé par UV et sans solvants. Cette solution économise à la fois la quantité de vernis à base de solvants utilisé dans les bobinages actuels et la quantité d'énergie consommée lors de la polymérisation de fil émaillé et lors de la phase d'imprégnation. Les caractéristiques mécaniques et électriques sont testées et comparées à celles d'un bobinage classique selon des méthodes normalisées ; les résultats des tests montrent que la nouvelle solution proposée, est aussi bien meilleure du point de vue environnemental que mécanique (force de collage) et électrique (tenue aux décharges partielles).

La deuxième solution, proposée en collaboration avec TKES fabricant de tôles magnétiques, permet la mise en place d'un nouveau circuit magnétique éco-efficace permettant l'amélioration de l'écobilan global de la machine de référence. Elle s'appuie sur une étude récente développée au sein du laboratoire LSEE qui propose l'utilisation des tôles magnétiques GO à la place de tôles NO en compensant la forte anisotropie de tôles GO par un tel assemblage spécifique de paquet de tôles statoriques.

Enfin, on a proposé également deux autres modifications ; l'utilisation de roulements "haut de gamme" déjà existants dans le commerce et le remplacement des composants en plastique d'origine pétrolière actuellement utilisés dans la construction des machines électriques par des plastiques à base de bio-polymères qui dérivent des sources biologiques et non dégradables. Trois bio-polymères ont été étudiés : l'acétate de cellulose, l'acétate butyrate de cellulose et le Gaïalène. Les diverses caractéristiques techniques de ces produits sont comparées à celle du produit de référence (le polypropylène). La comparaison montre la possibilité de remplacer le polypropylène par un bio-polymère en respectant les exigences techniques de fonctionnement.

Les pistes d'améliorations étudiées dans ce chapitre seront implémentées dans un prototype d'une machine asynchrone de 10 kW à impacts environnementaux réduits. Les tests nécessaires de validation seront réalisés dans le chapitre suivant.

Chapitre 4 :
**Prototype d'un moteur électrique à
faible impact environnemental**

4. Prototype d'un moteur électrique à faible impact environnemental

4.1. Introduction

Ce chapitre consiste à implémenter les diverses solutions d'améliorations, déjà présentées séparément sur des échantillons normalisés, dans un prototype de machine électrique de même puissance que celle de la machine de référence (10kW - 4 pôles). Ce prototype de moteur à faible impact est ainsi fabriqué avec des tôles GO, du fil émaillé UV sans solvant, du plastique d'origine végétale et enfin des roulements éco-énergétiques.

Une campagne d'essais a été réalisée sur le moteur prototype et, en parallèle, sur le moteur de référence afin de comparer ces performances à la machine de référence. Une norme internationale CEI 60034-2 [154] a été utilisée pour le calcul des comportements réels du nouveau moteur fabriqué. Au final, l'écobilan énergétique global de ce dernier est réalisé et comparé à celui de référence. Cela permet de mesurer l'intérêt écologique global de notre étude en prenant en compte toutes les phases du cycle de vie du moteur.

4.2. Réalisation d'un moteur prototype à faible impact

Le LSEE a l'expérience du travail avec des sous-traitants pour réaliser les bobinages électriques, découper des tôles et les assembler, réaliser des bancs d'essais, etc. L'opération de réalisation du prototype complet reste cependant un processus complexe et difficile qui a nécessité presque une année entière après la phase de caractérisation de la machine de référence en première année de thèse. Les processus nécessaires à la fabrication du prototype sont :

- Achat de deux machines de référence, la première devant servir de référence, la seconde devant être démontée pour réaliser le prototype. Ce dernier utilisera un nouveau bobinage statorique, un nouveau circuit magnétique statorique, de nouveaux roulements et des composants en bioplastique,
- Découpe des nouvelles tôles magnétiques GO fournies par le partenaire industriel (TKES à Isbergues) par le laser « YAG » conformément au plan de tôles d'origine (Oxymétal à Metz),
- Fabrication du nouveau fil émaillé sans solvant qui est polymérisé par UV et thermocollé (ACEBSA à Gironna-Espagne) et ajout d'une couche collante sur les isolants de fond d'encoches destinés au prototype (GII à Nœux-les-Mines),
- Réalisation d'un moule de ventilateur (Ovadesign à Paris) et injection de la nouvelle matière à base de bio-polymères pour fabriquer des échantillons de ventilateur (Lycée plasturgique à Auchel),
- Montage du nouveau circuit magnétique selon des recommandations spécifiques, bobinage du stator par le nouveau fil émaillé proposé et remontage des nouveaux roulements (ABMC à Calais),
- Collage du bobinage statorique thermo-adhérent selon des recommandations normalisées (LSEE à Béthune).

Il est à noter que l'objectif était de réaliser un prototype le plus similaire possible à la machine de référence quand à ses caractéristiques nominales, afin de pouvoir comparer directement le prototype à la machine de référence. En pratique, le nouveau fil n'était disponible qu'en un seul diamètre, ce qui a imposé d'utiliser un fil légèrement différent. Cela a conduit à quelques adaptations détaillé plus loin.

4.2.1. Caractérisation du bobinage statorique

La figure 4-1 représente le schéma du bobinage triphasé de la machine de référence, à 2 paires de pôles et 4 encoches par pôle et par phase. Ce bobinage est constitué de 12 bobines, chacune à 2 sections étagées. Chaque section contient 23 conducteurs formés de 2 groupes de fils en parallèle : 3 fils de diamètre 0,67 mm grade 2 et 1 fil de diamètre 0,63 mm grade 2. Cela implique une section équivalente de conducteur sans isolant de 1,369 mm² et avec isolant de 1,594 mm². Le coefficient de remplissage d'encoches vaut 0,5. La connexion des bobines par phase est réalisée en 2 voies en parallèle.

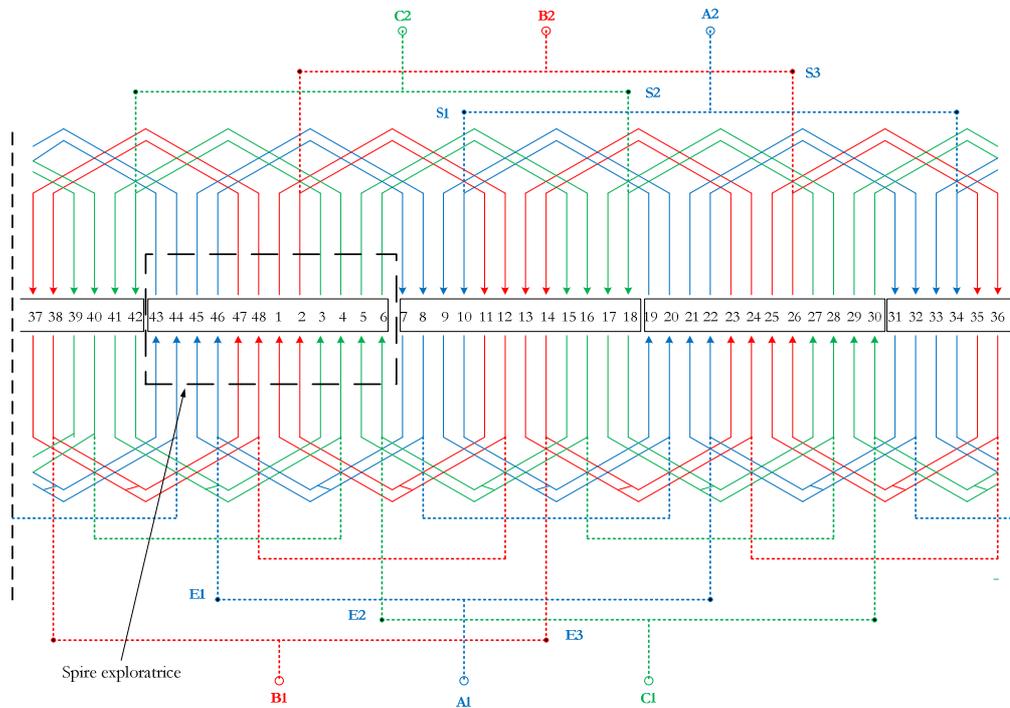


Figure 4-1. Plan du bobinage statorique de la machine de référence

Le bobinage du prototype est réalisé de la même façon que celui de la machine de référence sauf que le nouveau fil émaillé est de diamètre 0,95 mm grade 2B et, donc, le bobinage est effectué par 2 fils en parallèle. Cela implique une section équivalente de conducteur sans isolant de 1,417 mm² et avec isolant de 1,8 mm². De plus, en dehors de l'augmentation de section de fil, l'épaisseur de l'isolant de fond d'encoches statoriques est augmentée par une couche de polyamide thermocollante de 45 µm afin d'assurer la cohésion de bobinage thermo-adhérent.

Le coefficient de remplissage est augmenté à 0,57. En théorie (cas idéal où le bobinage est bien arrangé), le coefficient de remplissage maximum est estimé à 0,75. L'opération du bobinage avec le nouveau fil émaillé, même si elle est plus difficile, reste donc faisable.

4.2.2. Découpe de tôles statoriques

Les tôles statoriques GO ont été découpées exactement comme celles de la machine de référence à l'aide d'un laser « YAG » qui garantit une précision de découpe de 10 µm environ. L'expérience acquise au LSEE a permis de surmonter tout problème qui peut apparaître au cours de la réalisation pratique. Le premier problème vient des rainures pour les tiges de maintien. Elles doivent se superposer lors de l'assemblage des tôles. La solution choisie est de réaliser le décalage dans le plan de découpe de tôles statoriques comme l'indique la figure 4-2 qui considère un décalage de 90°. Compte tenu de la périodicité spatiale, il existe donc deux types de tôles. Une première tôle, type 1, est découpée sans être décalée et une deuxième, type 2, a un décalage de 90° par rapport à la première. Un

deuxième problème peut avoir lieu lors de l'assemblage des tôles une fois découpées car le sens de laminage est peu visible. La solution adaptée est la création de repères sur chaque tôle ; une fente sur la tôle type 1 et deux fentes sur la tôle type 2, comme le montre la figure 4-2. Donc les tôles peuvent être différenciées facilement et leur assemblage consiste à placer les tôles les unes après les autres dans l'ordre de repères (tôle type 1 – tôle type 2 – tôle type 1 – ...). Le diamètre d'alésage vaut 122,55 mm ; le diamètre extérieur de chaque tôle vaut 200 mm. On rappelle que DL désigne la direction de laminage.

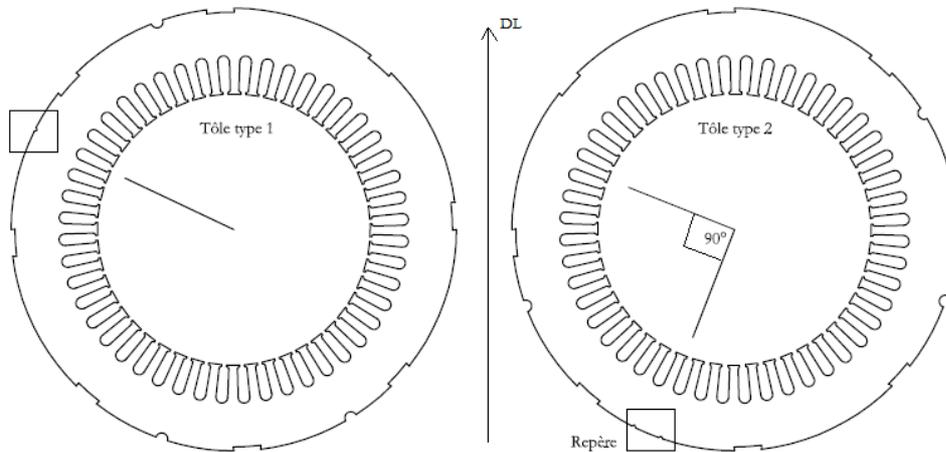


Figure 4-2. Plan de découpe de tôles décalées 90° sur la même plaque

4.2.3. Description du prototype livré

Le prototype livré au LSEE est équipée du nouveau circuit magnétique à base de tôles GO décalées, du nouveau bobinage thermo-adhérent à base de fil polymérisé par UV sans solvant, des roulements éco-énergétiques et du ventilateur à base de plastique végétal. Après ces divers changements, le prototype démonté est livré au LSEE (cf. figure 4-3).



Figure 4-3. Prototype du moteur asynchrone moins impactant

A la réception du prototype il est apparu que le bobineur n'a pas respecté le nombre de spires prévu au stator. Sur le nouveau moteur il n'y a que 20 spires au lieu de 23 spires sur le moteur de référence. L'analyse a posteriori a révélé que l'isolant de fond d'encoche thermocollable, lui aussi un prototype, expérimenté pour la 1^{ère} fois, présente une surépaisseur thermocollable non constante (présence de vagues sur l'isolant). Ceci, ajouté au bobinage, sans retour d'expérience sur le meilleur arrangement du nouveau fil, a provoqué l'apparition de cet aléa de réalisation imprévu. Finalement, le coefficient de remplissage du prototype bobiné avec 20 spires au lieu de 23 spires égale à 0,495. Il s'agit de diviser la valeur indiquée auparavant (0,57, cf. § 4.2.1 page 116) par le coefficient 1,15 (rapport de nombre de spires 23/20).

Une visite à l'entreprise ABMC réalisation du bobinage a été effectuée et un nouvel essai de bobinage a été effectué pour tester le remplissage des conducteurs considérés dans une couronne statorique découpée. Cet essai a montré la possibilité de rebobiner le prototype avec simplement des isolants de fond d'encoche plus fins et une cale de fermeture d'encoche, elle aussi plus petite. L'aléa constaté peut donc être corrigé dans le cadre d'une conception plus industrielle. Dans le cadre de ce travail, l'étude qui suit s'affranchit au mieux de cette différence parasite de bobinage, en travaillant à une induction d'entrefer constante. L'opération de collage après bobinage est effectuée dans une étuve à ventilation forcée au laboratoire à 200 °C pendant 2 heures selon les recommandations normalisées. En effet, la bobine thermocollée est chauffée dans l'étuve pendant une durée qui dépend de la grandeur et la forme de la carcasse statorique et est mesurée de façon à obtenir un chauffage uniformément réparti. La méthode de collage par application de courant continu n'a pas été utilisée car, d'une part, la feuille de polymère placée en fond d'encoche a été également enduite d'une couche de thermocolle sur ses deux faces, il fallut également la porter à la bonne température. D'autre part, le comportement thermique de bobinage complet du prototype est différent à celui des éprouvettes torsadées étudiées dans le chapitre 3, le choix d'un nouveau couple courant/temps de collage optimum est délicat. On a donc choisi la méthode d'étuvage afin de garantir de ne pas abîmer le système d'isolation électrique du notre prototype unique.

Le nombre de spires différent entre le moteur prototype et le moteur de référence implique, en effet, un fonctionnement à induction d'entrefer différente. Cela présente un problème pour comparer les performances des machines. La solution proposée est d'alimenter nos machines différemment, de façon avoir une induction de travail similaire. Le contrôle de l'induction d'entrefer est assuré par une simple mesure à l'aide d'une bobine exploratrice constituée d'un tour et collé en haut de l'encoche sur une distance polaire (cf. figure 4-1, page 116).

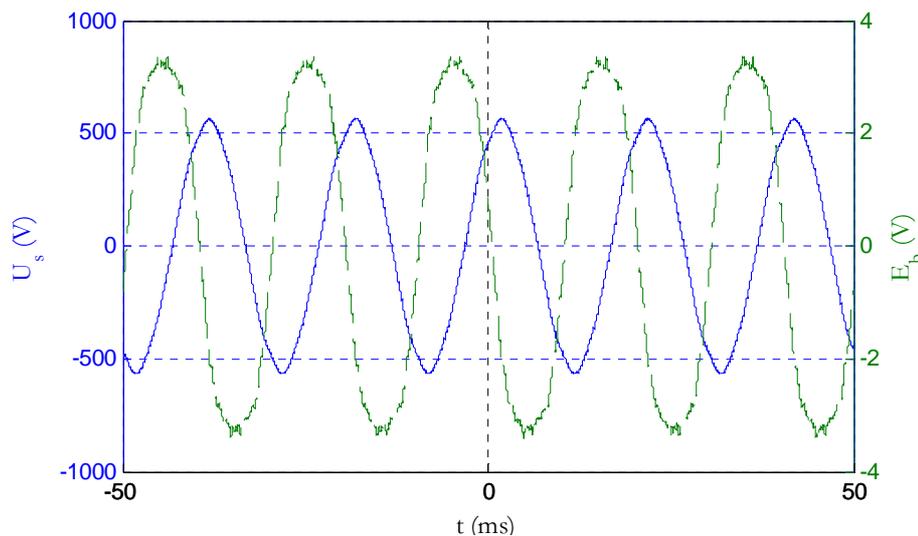


Figure 4-4. Tension d'alimentation U_s (trait continu) et f.é.m. induite de la machine de référence E_b (trait interrompu)

La bobine exploratrice permet de mesurer la f.é.m. induite E_b par l'onde d'induction d'entrefer. La figure 4-4 présente une tension composée d'alimentation U_s et la f.é.m. induite E_b mesurées lors d'un fonctionnement à vide de la machine de référence. L'onde E_b présente des harmoniques dues aux effets de denture et aux autres

phénomènes non linéaires. Le fondamental E_{b1} de E_b est ainsi directement mesuré afin de ne pas fausser la valeur du fondamental de l'induction d'entrefer B_δ . Avec ces informations, on peut déterminer l'induction crête fondamentale dans l'entrefer en intégrant sur un pas polaire l'expression de l'induction.

$$\hat{B}_\delta = \frac{p \cdot \hat{E}_{b1}}{L_a \cdot d_{is} \cdot \omega} \quad (4.1)$$

Où, ω est la pulsation d'alimentation, $d_{is}=122,55$ mm le diamètre d'alésage et $L_a=179$ mm la longueur de circuit magnétique statorique. Le Tableau 4-1 résume les valeurs mesurées à vide sur les machines testées.

Tableau 4-1. Valeurs fondamentaux mesurées sur les machines testées

	U_s (eff)	E_{b1} (eff)	B_δ (crête)
Machine de référence	400 V	2,51 V	1,03 T
Machine prototype	348 V	2,49 V	1,02 T

L'induction crête d'entrefer est de 1T, ce qui implique forcément une saturation de la machine au niveau des dents. Un calcul théorique de l'induction à l'aide des équations classiques de dimensionnement de machines peut confirmer le résultat précédent. On suppose que la chute de tension dans la résistance et l'induction de fuites statoriques est négligeable, on obtient alors :

$$E_\mu = \frac{U_s}{\sqrt{3}} = k'_a \cdot \langle \phi_e \rangle \cdot f \cdot N_s \quad (4.2)$$

Avec, U_s (eff)= 400 V, $N_s= 23 \times 4 \times 2=184$ est le nombre de spires en série par phase, $f=50$ Hz est la fréquence d'alimentation, $k'_a = k_b \cdot \frac{\pi}{\sqrt{2}}$ est le coefficient de Kapp où $k_b=0,957$ est le coefficient de bobinage. Donc l'induction crête d'entrefer qui s'exprime comme suit :

$$\hat{B}_\delta = \frac{\langle \phi_e \rangle \cdot \pi}{2 \cdot S_p} = 1,04 \text{ T} \quad (4.3)$$

$S_p = \frac{\pi \cdot d_{is} \cdot L_a}{2p}$ est la surface polaire. Ce calcul confirme ce qui a été mesuré avec la bobine exploratrice au Tableau 4-1.

4.3. Essai comparatif à vide

Le premier essai comparatif réalisé sur les machines est un essai à vide. Les pertes à vide ont été relevées pour différentes valeurs d'induction d'entrefer à l'aide de la mesure de la f.é.m. induite aux bornes de la bobine exploratrice. Les relevés ont été effectués après l'échauffement des machines pendant 2 heures afin qu'elles atteignent l'équilibre thermique. Les mesures ont été faites à l'aide d'un wattmètre triphasé de précision de type WT230 qui mesure une valeur instantanée du courant, de la tension et le déphasage entre les deux. Pour la fréquence 50 Hz, cet appareil de mesure présente une erreur de mesure de 0,1 % sur la lecture et de 0,1 % sur le calibre. Lors de relevés des mesures, on a choisi de travailler avec un calibre automatique afin de rester toujours proche de la zone de meilleure précision de l'appareil. Le basculement d'un calibre à un calibre inférieur se fait dès que la valeur de mesure sur la tension ou le courant est inférieure à 30 % du calibre en cours. En conséquence, le wattmètre travaille toujours entre 30 % et 100 % de ses calibres en tension et en courant.

L'erreur liée à la faible valeur du facteur de puissance lors de la mesure à vide est prise en compte via l'erreur de précision sur le calibre de l'appareil. En effet, la bonne précision de l'appareil correspond à un facteur de puissance (puissance active/puissance apparente) qui tend vers 1, alors le mode auto permet de changer le calibre afin que ce facteur soit proche de 1. Avec ce type de réglage, le constructeur garantit une erreur relative estimée au maximum à $\pm 1,4\%$.

Première méthode : les pertes à vide sont mesurées sur chaque machine l'une après l'autre ; la différence est ensuite calculée. L'incertitude dans le calcul de la différence ΔP_0 entre les puissances consommées par les deux machines testées P_{01} et P_{02} peut être doublée mais elle reste négligeable. La différence des puissances s'exprime comme suit :

$$\Delta P_0 = (P_{01} - P_{02}) \pm 0,014(P_{01} + P_{02}) \quad (4.4)$$

Deuxième méthode : afin de vérifier l'exactitude des mesures effectuées, on a décidé d'utiliser en parallèle de la méthode de mesure séparée, une deuxième méthode différentielle. Cette méthode consiste à mesurer directement la différence entre la puissance consommée par les deux prototypes au lieu de mesurer chaque puissance séparément pour calculer ensuite leur différence. Comme le neutre entre la source et la machine n'est pas relié alors $-i_3^{01} = i_1^{01} + i_2^{01}$. La puissance de la machine de référence P_{01} s'exprime comme suit :

$$P_{01} = \frac{1}{T} \int_0^T (u_{01}^{13;1} + u_{01}^{23;2}) dt$$

Où $u_{01}^{q;1}$ est la tension composée entre la phase q et q' et i_{01}^q est le courant de la phase q de la machine de référence. Si on alimente alors les deux machines à comparer en parallèle avec la même source de tension, la différence des puissances s'écrit :

$$\Delta P_0 = P_{01} - P_{02} = \frac{1}{T} \int_0^T [u^{13} (i_{01}^1 - i_{02}^1) + u_{23} (i_{01}^2 - i_{02}^2)] dt$$

La mesure de la différence des courants est réalisée selon le montage présenté à la figure 4-5 en utilisant des transformateurs d'intensité (TI). Ces TI peuvent rajouter inévitablement une légère erreur même s'ils sont étalonnés. Afin d'introduire le moins d'erreur lors de la mesure différentielle, on a choisi les TI après vérification de leurs rapports de transformations et leurs angles déphasages. Cette technique permet de mesurer ΔP_0 directement avec le wattmètre sans faire la différence. L'incertitude calculée précédemment de $\pm 1,4\%$ est applicable mais pour ΔP_0 , ce qui implique qu'elle est beaucoup plus faible que celle donnée par la formule (4.4).

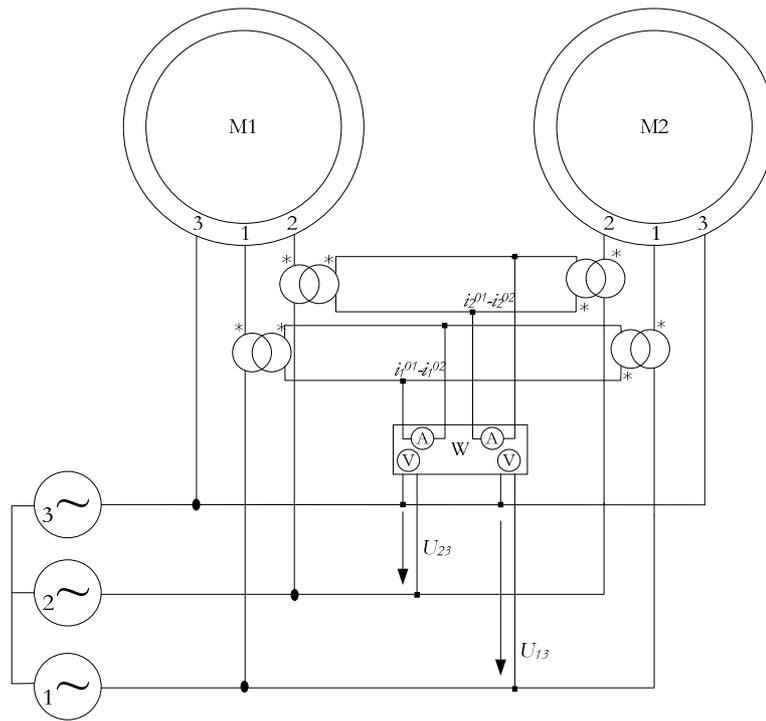


Figure 4-5. Montage du câblage pour la mesure de la différence de puissance

Cette méthode différentielle nécessite l'application de la même tension d'alimentation pour les deux machines à comparer. La difficulté de l'application de cette méthode sur notre prototype réside dans le fait que notre nouveau moteur possède trois spires de moins par rapport au moteur de référence. En appliquant la même tension de la source, les deux moteurs ne fonctionnent pas à la même valeur d'induction. Il est donc nécessaire de faire une correction afin de comparer les courbes des puissances à inductions d'entrefer identiques. La différence des puissances en fonction de la tension d'alimentation mesurée directement par le wattmètre est donnée par l'équation (4.5).

$$\Delta P_0(U_s) = P_{01}(B_1) - P_{02}(B_2) \quad (4.5)$$

Il est à noter que les inductions dans les deux machines sont différentes à même tension. Avec $B_2 = \alpha \cdot B_1$ où B_1 et B_2 sont respectivement les inductions d'entrefer de la machine de référence et la machine prototype pour une même tension donnée U_s , et $\alpha = 23/20$ est le coefficient correspondant au rapport des nombres de spires par phase de chaque machine. En mesurant la puissance de l'une des machines indifféremment, P_{01} ou P_{02} en fonction de la tension U_s , on peut reconstruire les courbes des puissances avec l'équation (4.6).

$$P_{02}\left(\frac{U_s}{\alpha}\right)_{|B_1} = P_{01}(U_s)_{|B_1} - \Delta P_0(U_s) \quad (4.6)$$

La figure 4-6 donne les puissances consommées à vide par les deux machines (origine et prototype) en fonction de l'induction d'entrefer, et selon les deux méthodes de mesure. On a indiqué sur la figure les incertitudes calculées de chaque point de mesure constituant les courbes des puissances à vide. Pour chaque machine, la courbe pleine est issue de la méthode directe. Les barres d'incertitudes précisées, dépendent du calibre utilisé. Les courbes en pointillés sont obtenues en utilisant la méthode différentielle ; les barres d'incertitudes sont trop petites pour être représentées.

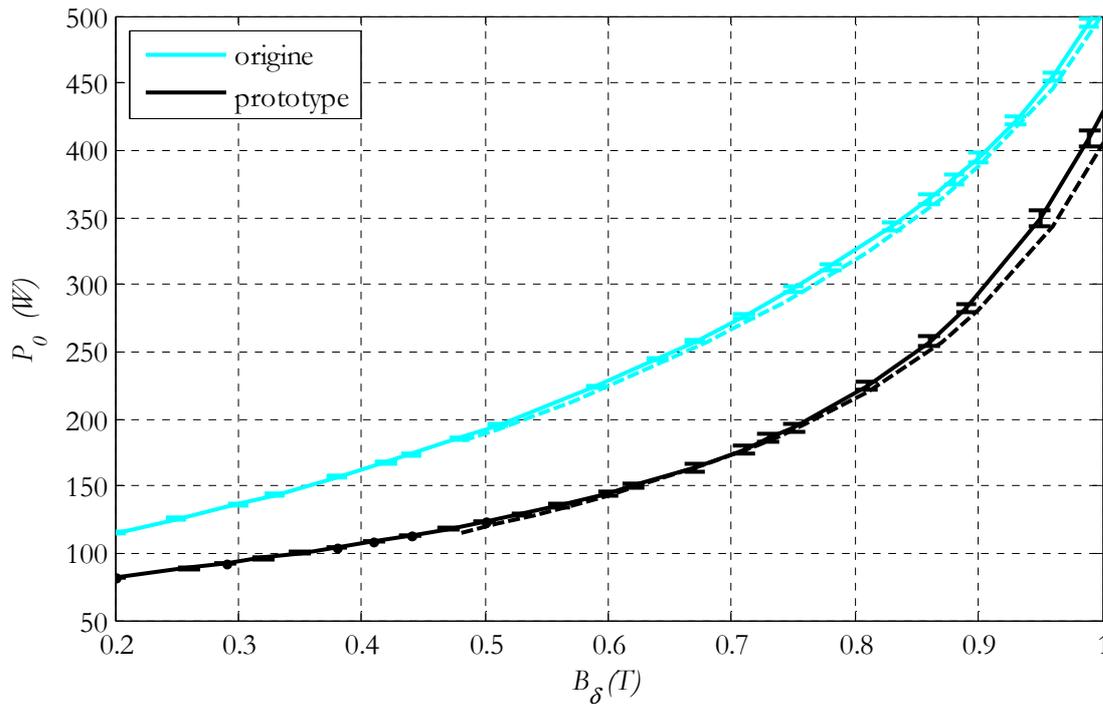


Figure 4-6. Puissance consommée à vide en fonction de l'induction d'entrefer selon la méthode séparée (trait continu) et la méthode différentielle (trait pointillé)

On aperçoit, d'après cette figure, que la machine prototype consomme moins de puissance à vide que la machine de référence pour toutes les valeurs d'induction d'entrefer. La différence des puissances consommées à vide est variable selon l'induction. Par exemple, à une induction de 0,8 T, la différence est de 100 W et elle diminue à 75 W pour 1 T où les machines deviennent relativement saturées. On remarque aussi que les résultats des mesures obtenus par les deux méthodes adaptées sont presque confondus et que les incertitudes de mesure calculées restent négligeables. La différence des puissances à vide provient de la réduction des pertes liées principalement à l'utilisation de la nouvelle structure magnétique à haute performance et aussi à l'utilisation des roulements éco-énergétiques. Dans la suite de ce chapitre, on sépare les pertes selon une méthode normalisée afin de différencier la contribution de chaque composant.

4.4. Détermination du rendement d'après la norme CEI

L'efficacité énergétique de la machine électrique est un point essentiel dans la réalisation de l'écobilan global qui considère tous les impacts environnementaux générés sur le cycle de vie. Afin d'évaluer le nouveau prototype éco-conçu, on propose de déterminer son rendement et de le comparer à celui de référence en fonction du point de fonctionnement. La norme internationale CEI 60034-2-1 préconise des méthodes normalisées pour déterminer le rendement à partir des mesures directes (couple, vitesse,...) ou des mesures indirectes de pertes séparées (pertes constantes et pertes en charge). Les pertes en charge sont des pertes dues à l'effet Joule dans les enroulements statoriques et rotoriques. Il y a deux méthodes pour mesurer ces pertes, soit à l'aide de l'essai en charge, soit à l'aide du schéma équivalent monophasé. Afin d'avoir une étude généralisée en fonction d'une large gamme de glissement et applicable sur toutes les machines de moyenne et forte puissance, la méthode basée sur le schéma équivalent (cf. figure 4-7) est utilisée. En plus, cette méthode ne nécessite pas l'implantation de capteurs de mesures sur l'arbre de machine ce qui est une tâche difficile surtout pour les grandes machines.

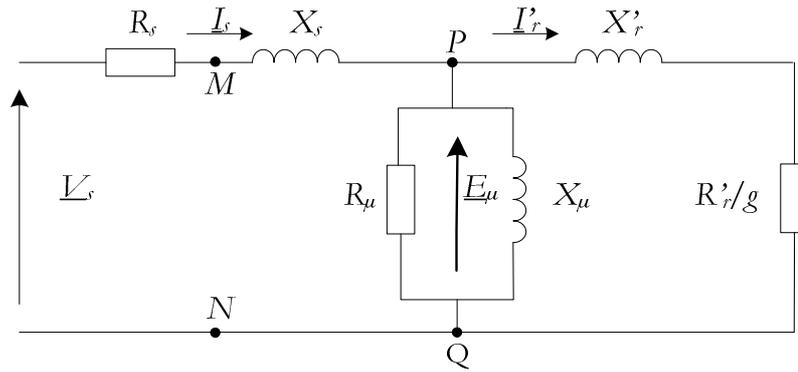


Figure 4-7. Schéma monophasé équivalent de la machine asynchrone

4.4.1. Essais classiques à courant continu, à vide et à rotor bloqué

i. Essai à courant continu

L'essai à courant continu permet de mesurer la résistance statorique R_s par la méthode voltampère-métrique à température ambiante (20°C). La mesure doit être réalisée selon la méthode à quatre points afin de ne pas tenir compte de la chute de tension sur les fils de connexions. La norme CEI 60034-1 précise qu'il faut ajuster la valeur de la résistance d'essai afin de prendre en compte la différence entre la température de la résistance mesurée à vide et la résistance d'enroulements en charge. Selon la classe d'isolation de la machine de référence, une classe F (c.-à-d. température d'isolation égale 155°C), la norme caractérise une température de fonctionnement nominale de 115°C . Donc, pour un conducteur de cuivre ayant une résistance $R_{s(0)}$ mesurée à une température T_0 , sa résistance R_s à une température T est calculée selon l'équation (4.7) issue de la norme CEI 34-1 qui prend en compte le coefficient de température du cuivre. Le Tableau 4-2 résume les différentes valeurs mesurées à vide et corrigées de la résistance statorique pour le moteur de référence et le nouveau prototype.

$$R_s = \frac{235 + T}{235 + T_0} R_{s(0)} \quad (4.7)$$

Tableau 4-2. Valeurs mesurées à vide et corrigées de la résistance statorique

Machine	Référence (NO65)	Prototype (GO35/90°)
$R_{s(0)} (T=20^\circ\text{C})$	0,41 Ω	0,35 Ω
$R_s (T=115^\circ\text{C})$	0,55 Ω	0,47 Ω

Une correction est introduite sur la valeur de la résistance statorique du moteur prototype en multipliant cette valeur obtenue dans le tableau ci-dessus par le coefficient 1,15 afin de ramener celle-ci à la valeur de la résistance au stator du prototype qui aurait été bobiné avec 23 spires au lieu de 20.

ii. Essai à rotor bloqué et à vide

Les essais classiques à rotor bloqué et à vide sont réalisés sur la machine de référence et le prototype afin de déterminer les différentes réactances du schéma équivalent. Le Tableau 4-3 résume les résultats obtenus pour les deux machines, de référence et prototype lors du test à rotor immobilisé où I_{sc} est le courant absorbé, U_{sc} est la tension réduite, P_{1sc} et Q_{1sc} représentent respectivement la puissance active et réactive consommée. Concernant l'essai à vide réalisé sur les deux machines, deux valeurs d'induction dans l'entrefer ont été considérées; une valeur d'environ 1 T où la machine est relativement saturée et une deuxième valeur où la machine fonctionne en-

dessous de la saturation. U_{s0} représente la tension statorique à vide, NI_{s0} sont les ampères-tours statoriques à vide, P_0 et Q_0 sont respectivement la puissance active et réactive absorbée à vide.

Tableau 4-3. Résultats d'essai à rotor bloqué

Machine	Référence (NO 65)	Prototype (GO 35/ 90°)
I_{sc} (A eff)	19,98	19,92
U_{sc} (V eff)	71,46	57,80
P_{Icc} (W)	1160,3	906,15
Q_{Icc} (Var)	2180	1717

Tableau 4-4. Résultats d'essai à vide pour une induction d'environ 1 T dans l'entrefer

Machine	Référence (NO 65)	Prototype (GO 35/ 90°)
U_{s0} (V eff)	400	348
NI_{s0} (A/m)	1840	2000
P_{s0} (W)	570	530
Q_{s0} (Var)	6870	7560

Tableau 4-5. Résultats d'essai à vide pour une induction d'environ 0,8 T dans l'entrefer

Machine	Référence (NO 65)	Prototype (GO 35/ 90°)
U_{s0} (V eff)	320	271
NI_{s0} (A/m)	1104	912
P_{s0} (W)	350	230
Q_{s0} (Var)	3260	2730

Les lignes de champs dans la structure décalée d'un angle 90° « passent » d'une tôle à une autre pour suivre la direction de laminage. Ce que fait, une tôle sur deux « reçoit » tous, contrairement à la structure NO où l'induction est répartie sur toutes les tôles. Donc à un 1 tesla d'entrefer, le circuit magnétique utilisant des tôles GO décalées est globalement plus saturé que l'autre. Ceci explique le fait qu'à vide et pour 1 T d'entrefer, la machine GO consomme plus de puissance réactive que la machine NO. La structure innovante du circuit magnétique utilisant de tôles magnétiques GO décalées est très favorable lors la machine fonctionne au dessous du coude de saturation. Pour cela on a choisi de refaire les essais pour une induction de 0,8T.

iii. Essai à tension variable

Cet essai consiste à déterminer de façon séparée les pertes constantes p_k dans la machine ; pertes mécaniques p_m (par frottement et ventilation) et pertes fer p_{fer} . Les pertes constantes sont calculées en réduisant les pertes Joule dans les enroulements statoriques à vide p_{js0} des pertes totales à vide ($p_k = P_0 - p_{js0}$, où $p_{js0} = 3 \cdot R_{s(0)} \cdot I_{s0}^2$). Il s'agit, d'après la norme, d'élaborer une courbe des pertes constantes en fonction du carré de la tension à vide, et avec extrapolation linéaire jusqu'à la tension nulle, on obtient les pertes par ventilation et par frottement qui sont considérées indépendantes de la charge. La figure 4-8 présente l'extrapolation linéaire des pertes à vide pour les deux machines comparées.

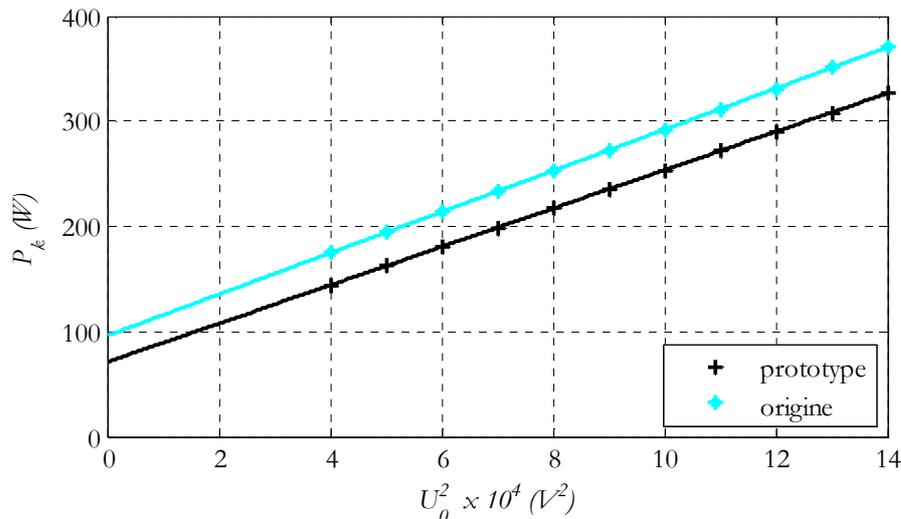


Figure 4-8. Pertes constantes extrapolées

Comme les roulements montés sur l'arbre de chaque machine sont différents, les valeurs de p_m relevées sur les courbes de la figure 4-8 sont différentes, 95 W pour la machine de référence et 72,5 W pour la machine prototype. Afin de vérifier cette différence relevée, un test de ralentissement a été effectué. Il consiste à alimenter les deux machines à vide en parallèle puis de couper l'alimentation. La machine qui présente plus de pertes mécaniques, devrait s'arrêter avant l'autre. On a marqué un temps d'arrêt de 9,37 secondes pour la machine de référence et 15,15 secondes pour la machine prototype.

Les pertes dans le fer sont tirées de la courbe $p_{fer} = p_k - p_m = f(U_{s0})$ à une tension qui donne une valeur connue d'induction dans l'entrefer. Le Tableau 4-6 présente les valeurs relevées de p_m et de p_{fer} pour un fonctionnement avec une induction de 1 T et 0,8 T dans l'entrefer pour chaque machine testée.

Tableau 4-6. Valeurs de pertes fer et pertes mécanique

Machine	Référence (NO65)	Prototype (GO35/90°)	Gain en %
$P_{fer} / 1T$ (W)	334	264	20,9 %
$P_{fer} / 0,8T$ (W)	206	117	43,2 %
P_m (W)	95	72,5	23,6 %

4.4.2. Paramètres du schéma monophasé équivalent

i. Réactances et résistance

L'application aux machines asynchrones à cage de la méthode normalisée nécessite des valeurs initiales pour X_s , X_r et du rapport X_s/X_r . L'essai à vide permet de calculer une valeur initiale de la réactance magnétisante $X_{\mu i}$ en partant de l'hypothèse que l'impédance magnétisante de la figure 4-7 est connectée aux points M et N, et que toute la puissance réactive à vide est consommée par $X_{\mu i}$. Puis, l'essai à rotor bloqué permet de donner la somme des réactances de fuites statorique et rotorique ($X_s + X_r$) lorsque le courant dérivé par l'inductance magnétisante X_{μ} est négligé. On a donc choisi une valeur initiale arbitraire de 1 pour le rapport X_s/X_r . Cela implique :

$$\begin{aligned}
 X_{\mu i} & \square \frac{3.E_{\mu}^2}{Q_0} \\
 N\omega & = X_s + X'_r = \frac{Q_{1cc}/3}{I_{scc}^2} \\
 X_{s i} & \square N\omega/2
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Avec E_{μ} est F.é.m. induite aux bornes de la réactance magnétisante qui est déterminée en tenant compte de la chute de tension statorique :

$$\begin{aligned}
 E_{\mu} & = \sqrt{\left(\frac{U_{s0}}{\sqrt{3}} - I_{s0}R_s \cos \varphi_0\right)^2 + (I_{s0}R_s \sin \varphi_0)^2} \\
 \cos \varphi_0 & = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_{s0}I_{s0}}
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

La norme propose une méthode itérative pour retrouver les paramètres du schéma équivalent de façon séparée et précise. Cette méthode consiste à calculer de nouveau X_s , X_{μ} et le rapport X_s/X'_r en utilisant les valeurs initialement trouvées. Toutes les relations données ci-dessous sont tirées de l'analyse du schéma équivalent de la figure 4-7 [155].

$$X_{\mu} = \frac{3\left(\frac{U_{s0}}{\sqrt{3}}\right)^2}{Q_0 - 3X_s I_{s0}^2} \frac{1}{\left(1 + \frac{X_s}{X_{\mu}}\right)^2} \tag{4.10}$$

$$X_s = \frac{Q_{1cc}}{3I_{scc}^2 \left(1 + \frac{X_s}{X'_r} + \frac{X_s}{X_{\mu}}\right)} \left(\frac{X_s}{X'_r} + \frac{X_s}{X_{\mu}}\right) \tag{4.11}$$

$$X'_r = \frac{X_s}{\frac{X_s}{X'_r}} \tag{4.12}$$

Ce calcul doit être fait en plusieurs itérations jusqu'à avoir une différence entre deux calculs consécutifs de 0,1%. Ensuite, on détermine la résistance équivalente aux pertes dans le fer à la tension assignée U_s à partir de l'équation (4.13) qui est aussi issue de la même norme:

$$R_{\mu} = \frac{3\left(\frac{U_s}{\sqrt{3}}\right)^2}{p_{fer}} \left(\frac{1}{\left(1 + \frac{X_s}{X_{\mu}}\right)^2} \right) \tag{4.13}$$

p_{fer} sont les pertes fer trouvées précédemment et la résistance rotorique ramenée au stator est calculée suivant l'équation (4.14).

$$R'_r = \left(\frac{P_{1cc}}{3I_{scc}^2} - R_s\right) \left(1 + \frac{X'_r}{X_{\mu}}\right)^2 - \left(\frac{X'_r}{X_s}\right)^2 \left(\frac{X_s^2}{R_{\mu}}\right) \tag{4.14}$$

Les éléments du schéma équivalent ont été calculés pour chaque machine avec des nombres de spires par phase équivalent égaux, en tenant compte du coefficient définissant le rapport (1,15=23/20) entre le nombre de

spires par phase des deux machines testées. En effet, les calculs des paramètres du schéma équivalent sont basés sur les essais. Alors il s'agit d'introduire une correction sur les résultats de mesure effectuée lors de ces essais pour tenir compte de faite que le prototype possède moins de spires. La tension mesurée à vide est multipliée par le coefficient (1,15) ; le courant à vide est divisé par 1,15 et les puissances sont aussi divisées par 1,15.

On considère donc dans la suite de l'étude un prototype virtuel qui aurait été bobiné avec 23 spires, sachant que dans le cas d'une fabrication industrielle, le problème de manque de spires expliqué précédemment n'aurait pas été posé. Deux valeurs d'inductions dans l'entrefer ont été considérées: 1 T (cf. Tableau 4-7) et 0,8 T (cf. Tableau 4-8).

Tableau 4-7. Paramètres du schéma équivalent monophasé pour 1T d'induction dans l'entrefer

Type	$R_s (\Omega)$	$X_s (\Omega)$	$R_\mu (\Omega)$	$X_\mu (\Omega)$	$X'_r (\Omega)$	$R'_r (\Omega)$
Référence (NO65)	0,55	0,96	438,8	22,36	0,85	0,45
Prototype (GO35/90°)	0,54	1,008	556,1	23,61	0,9	0,5

Tableau 4-8. Paramètres du schéma équivalent monophasé pour 0,8T dans l'entrefer

Type	$R_s (\Omega)$	$X_s (\Omega)$	$R_\mu (\Omega)$	$X_\mu (\Omega)$	$X'_r (\Omega)$	$R'_r (\Omega)$
Référence (NO65)	0,55	0,95	465,5	30,4	0,87	0,44
Prototype (GO35/90°)	0,54	0,97	788,5	40,18	0,93	0,49

ii. Impédance dépendant de la charge

Afin de déterminer les caractéristiques de la machine en fonction de la charge, on a calculé les éléments du modèle réduit de la machine présenté à la Figure 4-9. Cela implique de déterminer le modèle réduit pour le calcul de la machine asynchrone en remplaçant les éléments du coté droit des points P et Q du schéma équivalent de la figure 4-7 par une résistance et réactance équivalente.

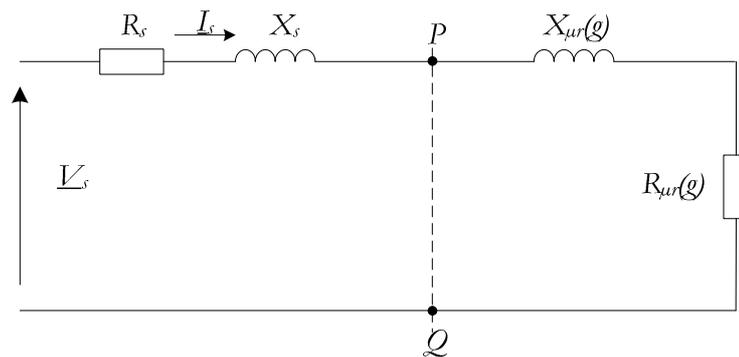


Figure 4-9. Modèle réduit pour le calcul de la machine asynchrone

Les relations suivantes figurent dans la norme CEI 60034-2-1 :

$$Z_r = \sqrt{\left(\frac{R'_r}{g}\right)^2 + X_r'^2} \quad Y_{\mu r} = \sqrt{\left(\frac{R'_r/g}{Z_r^2} + \frac{1}{R_\mu}\right)^2 + \left(\frac{X'_r}{Z_r^2} + \frac{1}{X_\mu}\right)^2}$$

$$R_{\mu r} = \frac{\frac{R_r'}{g} + \frac{1}{R_\mu}}{\frac{Z_r'^2}{Y_{\mu r}^2}} \quad X_{\mu r} = \frac{\frac{X_r'}{Z_r'^2} + \frac{1}{X_\mu}}{Y_{\mu r}^2}$$

L'impédance résultante vue de l'entrée est : $R_t = R_s + R_{\mu r}$ $X_t = X_s + X_{\mu r}$ $Z_t = \sqrt{R_t^2 + X_t^2}$

iii. Courants et Pertes

Les différentes grandeurs électriques sont calculées à partir des paramètres du schéma équivalent monophasé comme indiqué ci-dessous :

- ✓ Le courant de la phase statorique : $I_s = \frac{U_s}{\sqrt{3} \cdot Z_t}$,
- ✓ Le courant de la phase rotorique : $I_r' = I_s \left(\frac{1}{Z_r'} \cdot Y_{\mu r} \right)$,
- ✓ La puissance d'entrefer transmise : $P_{tr} = 3 I_r'^2 \frac{R_r'}{g}$,
- ✓ Les pertes fer : $p_{fer} = 3 I_s^2 \frac{1}{Y_{\mu r}^2} \cdot R_\mu$,
- ✓ Les pertes Joule du stator : $p_{js} = 3 I_s^2 R_s$,
- ✓ Les pertes Joule du rotor : $p_{jr} = 3 I_r'^2 R_r'$,
- ✓ Les pertes supplémentaires en charge : $p_{LL} = a \cdot (I_s^2 - I_{s(0)}^2)$,

Où a est le coefficient défini au chapitre 2 (cf. § 2.3.4, page 50), il est déterminé par l'expérimentation et vaut 0,8 (W/A²) pour le cas de notre machine. Notons par P_{tr} la puissance transmise au rotor.

- ✓ Les pertes totales : $p_t = p_{js} + p_{jr} + p_{LL} + p_{fer} + p_m$,
- ✓ La puissance d'entrée : $P_1 = 3 I_s^2 R_t$,
- ✓ La puissance de sortie : $P_2 = P_1 - p_t$,
- ✓ Le rendement : $\eta = \frac{P_2}{P_1}$,
- ✓ Le facteur de puissance : $\cos \psi = \frac{R_t}{Z_t}$,
- ✓ La vitesse rotorique : $\Omega = (1 - g) \frac{\omega}{p}$,
- ✓ Le couple électromagnétique : $C_e = \frac{P_{tr}}{\Omega}$.

4.4.3. Caractéristiques énergétiques

La comparaison suivante concerne les performances énergétiques des machines testées (origine et prototype) en régime permanent en fonction de la charge associée. Les grandeurs énergétiques illustrées par les figures de 4.10 jusqu'à 4.14 sont déduites à partir du schéma équivalent monophasé après qu'on a déterminé ces paramètres à l'aide des essais. On a adapté cette méthode du schéma équivalent qui permet de déterminer les différentes performances énergétiques selon la charge imposée, et sur une large gamme du glissement pour notre machine prototype ou n'importe quelle autre.

La figure 4-10 (a) présente le courant absorbé à l'entrée de chaque machine I_s et les pertes fer p_{fer} en fonction du glissement g pour une induction dans l'entrefer de 1T. On constate que la machine prototype fabriquée avec de tôles GO35 décalées de 90° consomme moins de courant que la machine de référence fabriquée avec de tôles

NO65 pour les différentes valeurs du glissement. Cette réduction de courant absorbé peut être attribuée à la diminution du courant nécessaire à la magnétisation du circuit magnétique et à la diminution des pertes fer. En effet, on observe sur la figure 4-10 (b) une différence des pertes fer d'environ 65 W en faveur du nouveau prototype.

Cette réduction de courant absorbé obtenue avec la machine prototype se traduit directement par une diminution des pertes Joule dans les enroulements statoriques (cf. figure 4-11 (a)) d'environ 150 W et des pertes supplémentaires en charge, environ 70 W (cf. figure 4-11 (b)). La légère diminution de la résistance statorique, à cause de l'augmentation légère de la section du fil de bobinage, a aussi une conséquence sur la réduction des pertes Joule statoriques mais sa contribution reste négligeable devant celle de la réduction de courant absorbé.

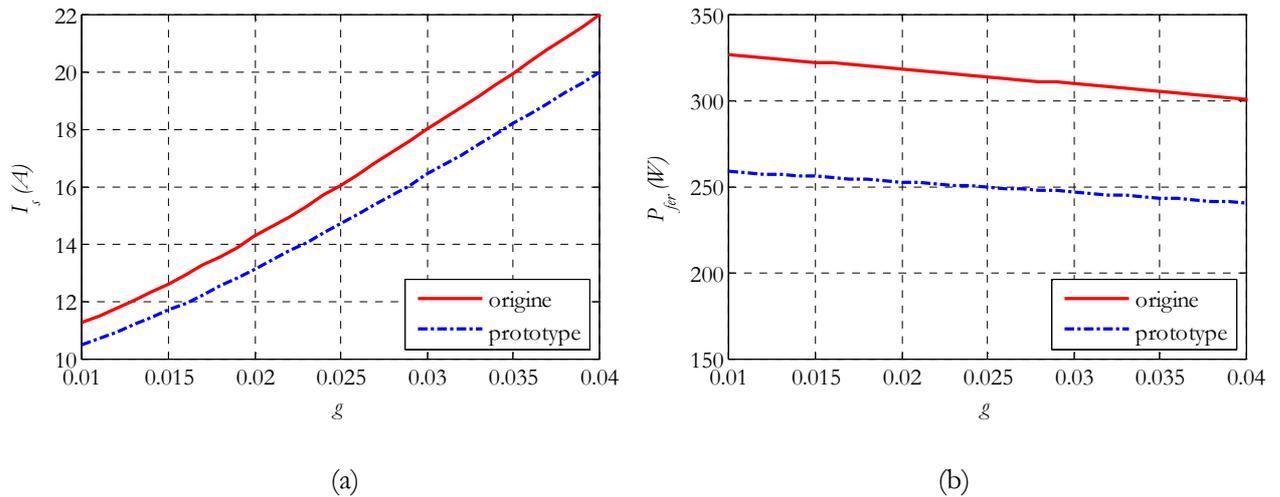


Figure 4-10. Courant statorique (a) et Pertes fer (b) en fonction du glissement « g » (400V/1T), le glissement nominal vaut 4 %

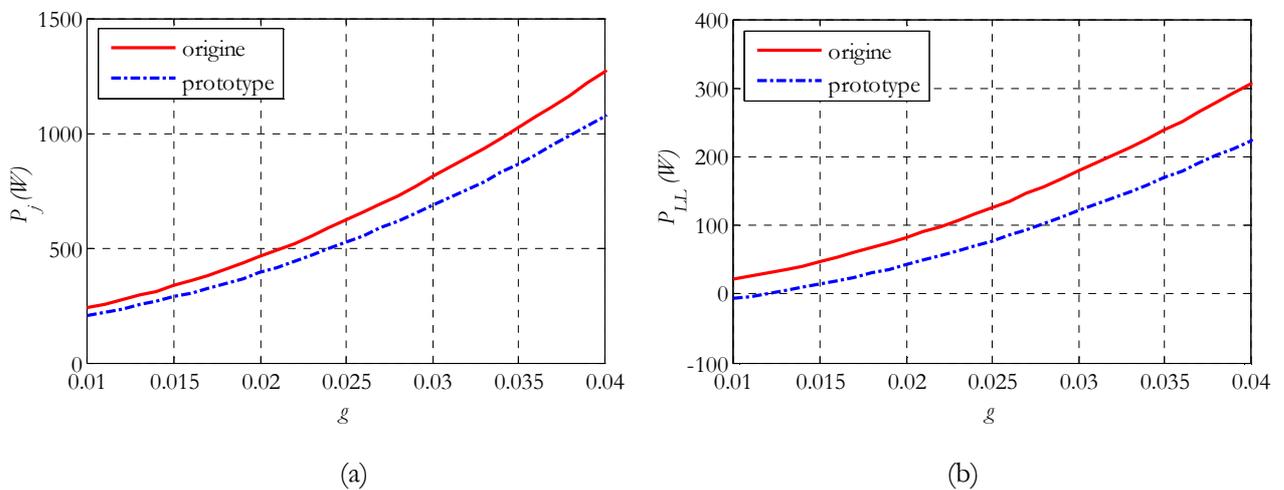


Figure 4-11. Pertes en charge (a) et Pertes supplémentaires (b) en fonction du glissement « g » (400V/1T), le glissement nominal vaut 4 %

En rappelant la réduction réalisée d'environ 22 W sur les pertes par frottement (cf. Tableau 4-6, page 125), on peut apprécier un gain de rendement important donné par la figure 4-12 (a). En comparant la machine de référence et la machine prototype pour une induction d'entrefer de 1T, on observe que le rendement est meilleur d'environ 1 point pour $g=4\%$ et d'environ 2 points pour $g=2\%$. Ce résultat obtenu est très intéressant et bien supérieur aux estimations basses décrites au chapitre 3 et qui incluent les pertes fer rotorique du moteur statique. Cette augmentation du rendement se traduit dans l'écobilan global de la machine par une réduction importante

des impacts environnementaux générés sur la phase d'usage qui dure plus de 20000 heures dans un cas du service continu.

La figure 4-12 (b) donne le couple électromagnétique de chaque machine en fonction de la vitesse de rotation. D'après cette figure, il n'y a pas de changement introduit sur le couple développé, ce qui est cohérent car le prototype fonctionne à une même valeur d'induction d'entrefer que la machine de référence et avec un rotor identique.

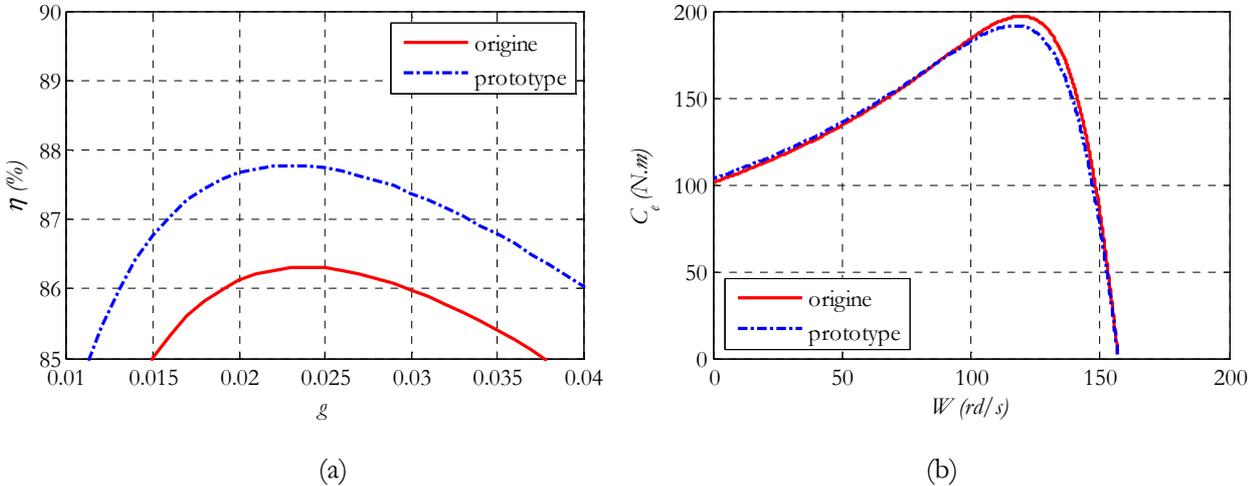


Figure 4-12. Rendement (a) et Couple électromagnétique (b) en fonction du glissement « g » (400V/1T), le glissement nominal vaut 4 %

Notre machine de référence est relativement saturée ; elle fonctionne à une induction d'entrefer de 1T, ce qui est relativement élevé. Cela implique une dégradation des performances des tôles électriques utilisées dans la fabrication du prototype. On a donc décidé de comparer, encore une fois, la machine de référence et le prototype éco-conçu pour un fonctionnement à une induction d'entrefer plus faible, 0,8 T. La figure 4-13 en (a) et (b) montrent les pertes Joule et les pertes fer en fonction du glissement pour une induction d'entrefer de 0,8 T. On remarque cette fois une réduction plus importante au niveau des pertes fer (environ 100 W) et des pertes Joule (jusqu'à 200 W).

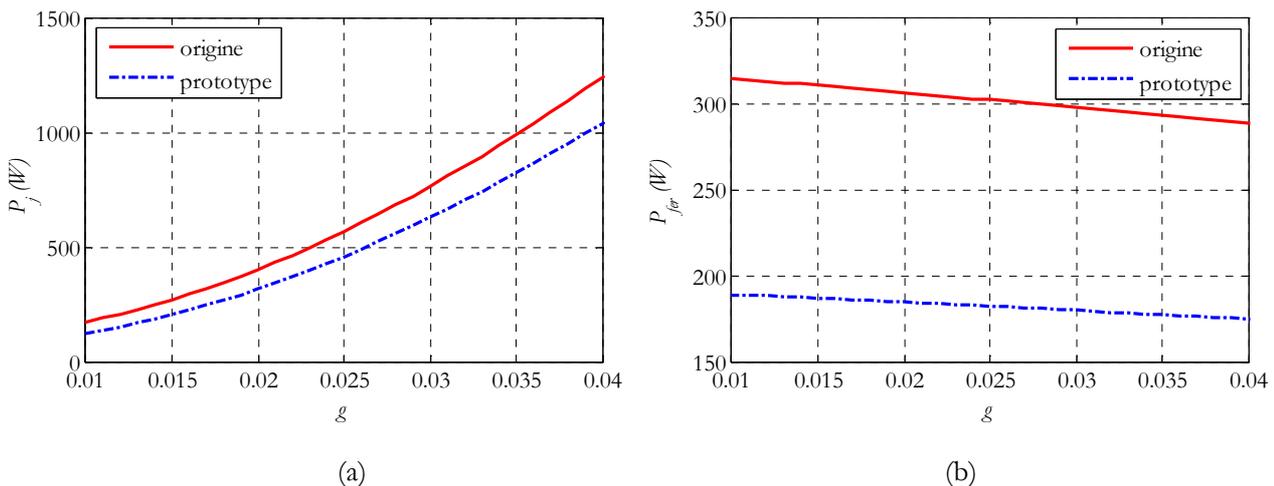


Figure 4-13. Pertes Joule (a) et Pertes fer (b) en fonction du glissement « g » (320V/0,8T), le glissement nominal vaut 4 %

Cela se traduit au niveau du rendement (figure 4-14 (a)) par un gain de 2 points pour $g=4$ % et de 3 points pour $g=2$ %. De plus, on observe une augmentation du facteur de puissance sur la figure 4-14 (b) provenant des effets de la haute perméabilité des tôles GO en absence de saturation.

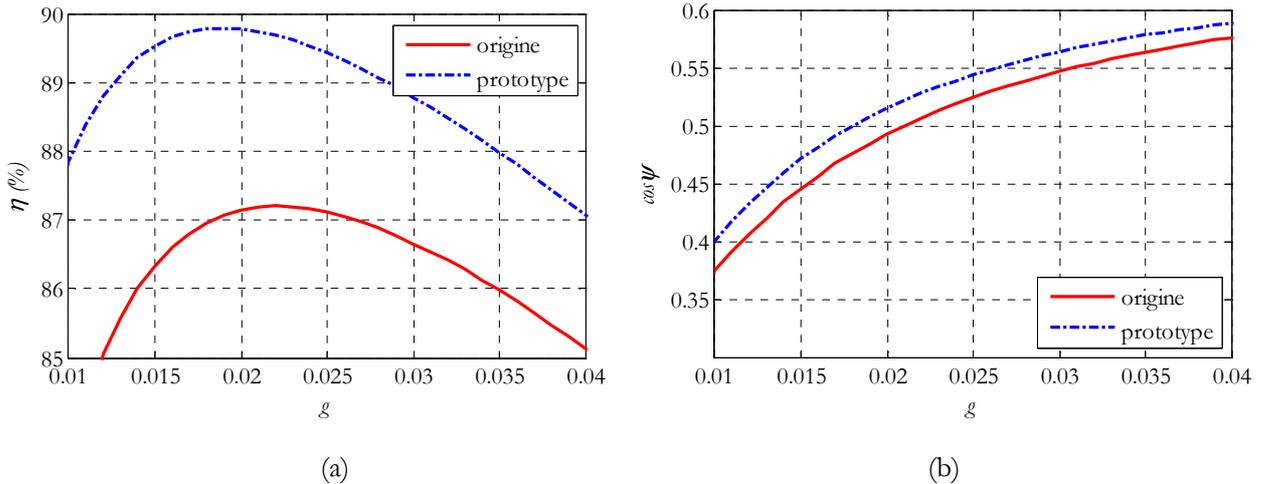


Figure 4-14. Rendement (a) et Facteur de puissance (b) en fonction du glissement « g » (320V/0,8T), le glissement nominal vaut 4 %

Il est à noter que la diminution de l'induction d'entrefer dans le cas du notre prototype revient à dégrader sa puissance nominale mais l'objectif de la comparaison effectuée à une induction 0,8 T est d'évaluer les performances énergétiques de la nouvelle structure magnétique utilisée dans le prototype hors saturation. Dans le cadre d'une nouvelle conception d'une machine utilisant la structure décalée à base de tôles GO, il est possible de dimensionner la machine pour travailler un peu au-dessous du coude de saturation afin de ne pas dégrader les performances de l'empilement des tôles GO décalées.

4.5. Ecobilan global du prototype

Après la série d'essais menée sur la machine prototype et la détermination de son rendement, on passe à la réalisation de son écobilan énergétique global afin le comparer à celui de la machine de référence. Cet écobilan considère l'utilisation des tôles GO avec un gain de rendement de 1,84 points obtenu au régime nominal ($g=4\%$), les nouveaux roulements éco-énergétiques (+0,16 points de rendement), les nouveaux fils thermocollés avec leur économie de vernis d'imprégnation, de solvant et d'énergie pour l'émaillage.

Il est à noter que le surcoût environnemental lié à la phase de fabrication de tôles magnétiques à grains orientés et de fils UV et thermocollés, est pris en compte. La validation via une ACV des bioplastiques s'avère prématurée car les données sont actuellement indisponibles. Pour notre étude ACV, les bénéfices des bioplastiques n'ont pas été considérés dans l'écobilan du prototype à cause de l'indisponibilité de données aujourd'hui, ils ont donc été considérés identiques aux plastiques pétroliers.

L'écobilan comparatif de la figure 4-15 est réalisé pour un type de service continu où les machines fonctionnent 20000 heures de temps cumulé et consomment durant la phase de travail de l'électricité de référence française qui correspond à un part important de production nucléaire. On obtient un gain environnemental global sur le prototype réel selon tous les critères d'impact.

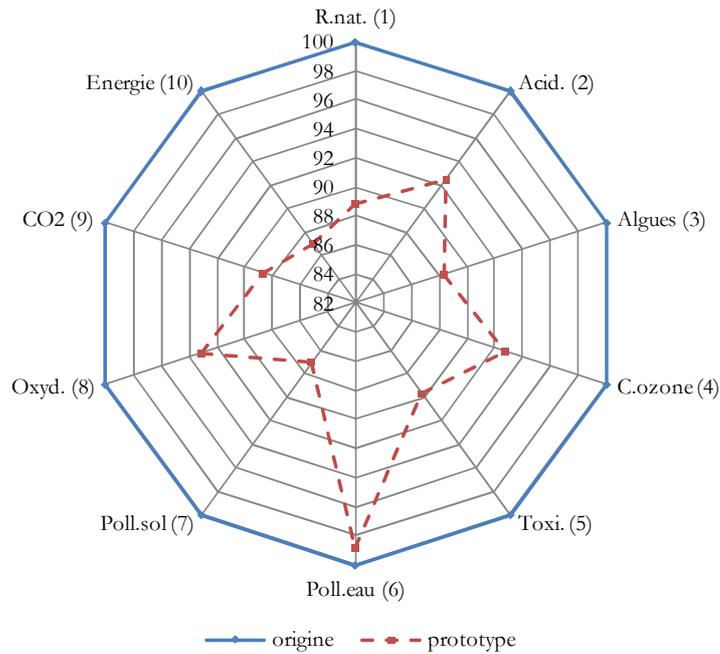


Figure 4-15. Comparaison entre l'écobilan global de la machine prototype et la machine de référence, fonctionnement continu 20000 heures et électricité consommée d'origine française

La figure 4-16 donne la contribution de chaque solution adaptée lors de la fabrication du nouveau prototype dans l'amélioration obtenue de l'écobilan de la machine de référence et ainsi dans la réduction des impacts environnementaux globaux. On constate que le gain environnemental réalisé pour ce type de service tient essentiellement à l'utilisation de la nouvelle structure magnétique décalée utilisant de tôles à grains orientés à hautes performances énergétiques. Cela justifie l'importance de 2 points gagnés sur le rendement pour un glissement nominal ($g=4\%$).

L'intérêt des nouveaux fils thermocollés peut sembler faible même si leur influence reste visible sur quelques critères. Mais il faut noter que leur utilisation ne dégrade en rien les performances énergétiques du moteur et le potentiel de gain est donc à multiplier par le nombre de moteurs conçus chaque année (30 millions), soit des tonnes de solvants nocifs et cancérigènes éliminés.

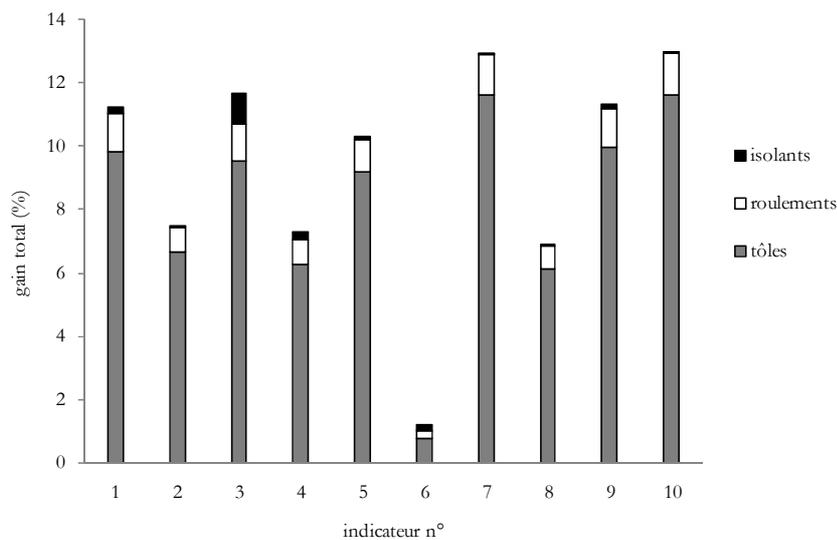


Figure 4-16. Contribution de différentes pistes d'améliorations dans l'écobilan global de la machine pour un type de service continu (20000 heures)

Afin de déterminer les limites environnementales de ces nouvelles écotéchnologies, on a déterminé le gain total obtenu pour chaque critère d'impact en fonction de temps de fonctionnement cumulé. Pour des raisons de clarté, sur la figure 4-17, les impacts dont les courbes étaient proches sont représentés par un seul tracé.

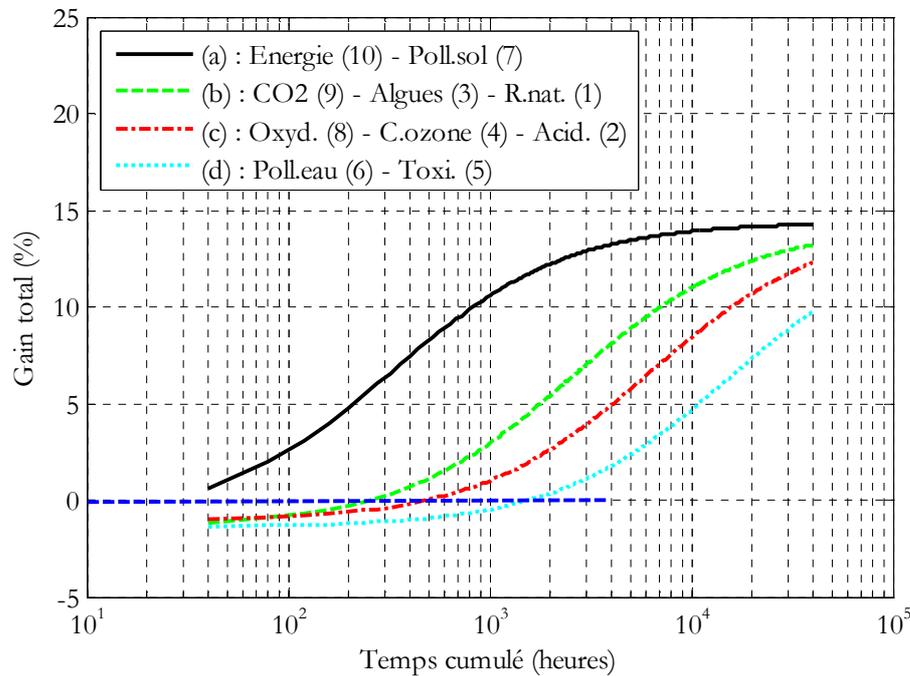


Figure 4-17. Gain environnemental selon les critères d'impact en fonction de temps de travail cumulé de la machine

D'après cette figure, on remarque que l'écobilan global du prototype reste positif selon tous les critères au delà un temps de fonctionnement cumulé d'environ 1500 heures. Cela signifie que les machines construites en s'inspirant du prototype seront avantageuses pour toutes les applications qui dépassent cette durée. Seules quelques applications présentent une si courte durée de fonctionnement, par exemple, les moteurs de volets roulants ou de portes de garage qui ne sont sollicités chaque jour que pour une montée et une descente de quelques secondes.

4.6. Conclusion

Ce chapitre s'intéresse à la réalisation d'un moteur éco-conçu avec les solutions innovantes proposées afin de réduire l'impact environnemental global. Pour cet exercice, un moteur « témoin » a été choisi pour servir de base de comparaison. Les composants du moteur qui ont été refaits sont les fils émaillés entrant dans la fabrication des enroulements, les matériaux plastiques utilisés pour les éléments comme le ventilateur, la boîte à bornes etc., le circuit magnétique du stator et les roulements des paliers. Il est à noter que les processus de fabrication de ce prototype sont des opérations délicates qui prennent beaucoup de temps et qui se sont écoulées sur les deux premières années de la thèse. Après la livraison du prototype démonté, un procédé de thermocollage a été effectué sur le moteur afin de coller son bobinage qui n'est pas imprégné. Puis, le moteur a été monté en ajoutant une bobine exploratrice constituée d'une spire afin de comparer les performances du prototype à celles de la machine de référence à la même valeur d'induction dans l'entrefer.

Afin d'avoir une bonne précision lors de la comparaison des moteurs, une méthode différentielle de mesure a été utilisée. Ceux-ci permettent de mesurer directement la différence entre les puissances consommées à vide par les deux machines. Les relevés de mesure de puissances à vide ont été faits à différentes valeurs d'induction d'entrefer. Celles-ci montrent qu'il existe un gain énergétique non négligeable grâce, essentiellement, à l'utilisation

des tôles GO décalées. Les essais indiquent qu'à vide, entre 0,7 T et 0,9 T d'induction crête d'entrefer, le prototype utilisant des tôles GO décalées de 90° présente environ 100 W (c.-à-d. environ 45 %) de moins de pertes que la machine de référence utilisant des tôles NO.

On s'est intéressé aussi aux performances en charge. La norme CEI 60034-2-1 de 2007 préconise la méthode basée sur le schéma monophasé équivalent pour déterminer, avec précision, le rendement de la machine asynchrone. Cette méthode permet de calculer les diverses caractéristiques (courants, pertes, couple,...) des machines en considérant leurs différences. Les résultats montrent que, à une valeur d'induction d'entrefer de 1T, le prototype présente un gain de rendement de 1 point pour un glissement de 4 % et de 2 points pour un glissement de 2 %. Ce gain croît, pour une induction d'entrefer de 0,8 T, vers 2 à 3 points pour les mêmes glissements. D'après la norme de classe de rendement des machines électriques tournantes CEI 60034-30, notre prototype passe d'une classe actuelle IE1 « standard » à la classe supérieure IE2 « haut rendement » ou même IE3 « premium » si on réduit un peu l'induction dans l'entrefer.

L'écobilan global de la machine prototype qui tient en compte de toutes les solutions proposées, est réalisé et comparé à celui de la machine de référence selon un type de service continu avec un temps de fonctionnement cumulé de 20000 heures et pour une consommation d'électricité française. Ce dernier montre que les surcoûts initiaux liés à la fabrication sont largement compensés selon tous les critères d'impact jusqu'à un temps de fonctionnement cumulé de 1500 heures.

Conclusions et perspectives

Conclusion générale

Une démarche d'éco-conception considère, contrairement à une méthode de conception classique, toutes les phases du cycle de vie d'un produit depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie. L'objectif étant d'évaluer, dès la conception, les impacts environnementaux produits non seulement pendant l'usage, mais aussi sur la phase de fabrication et la fin de vie. L'un des outils performants de l'éco-conception est l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) qui est aujourd'hui considérée comme la référence afin d'évaluer les impacts potentiels d'un produit sur tout son cycle de vie.

L'ACV quantifie les ressources, les émissions dans l'air / le sol / l'eau, les productions de déchet et l'énergie consommées pour un seul produit sur son cycle de vie. Les méthodes d'évaluation utilisées impliquent de multiples critères environnementaux, ce qui évite les transferts de pollution.

Des outils informatiques associent des bases de données quantifiant les empreintes environnementales de nombreux matériaux et procédés ainsi que des méthodes de calcul ; des critères agrégés et normalisés ont été définis par ces méthodes et rendent possible des analyses qui, autrement, ne pourraient pas être réalisées. Le logiciel retenu pour extraire les valeurs des impacts environnementaux nécessaire à cette étude a été Simapro assorti à la base Ecoinvent et les méthodes de calcul ont servi à mettre en évidence les résultats sur 10 critères classiques.

Les motorisations électriques sont présentés en nombre important (environ 300 millions des moteurs installés dans l'industrie, l'infrastructure et les grands bâtiments et 30 millions des nouveaux moteurs sont vendus chaque année). L'essentiel des innovations qui les concernent ont, pour seul objectif, l'amélioration de la phase d'usage dans l'hypothèse d'une utilisation continue (amélioration du rendement). Une démarche d'éco-conception est donc pertinente pour appréhender les motorisations électriques selon une vision plus large. L'étude ACV de la machine nécessite principalement de connaître, d'une part, les masses de différents composants constituant la machine (ces quantités servent à déterminer les impacts environnementaux de construction et de fin de vie) et d'autre part, ses pertes énergétiques selon son type de service qui, associé à la puissance, servent à déterminer les impacts de la phase d'usage.

Le cas des machines asynchrones triphasées de quelques kW a été retenu, une modélisation géométrique et électrique a été réalisée afin de pouvoir prédire ces paramètres dès la conception. L'outil Simapro a fourni les impacts élémentaires, pour chaque critère, des matériaux et des processus nécessaires. On peut noter que, la phase de fabrication est toujours fondée sur une consommation de l'électricité mixte européenne. Pour la fin de vie, les données utilisées sont celles du scénario Français standard "Ecoinvent", de déchets complété en termes de pourcentage de recyclage par les données de l'ADEME.

Un modèle permettant de réaliser rapidement l'ACV de n'importe quelle machine asynchrone standard (dans la gamme de puissance retenue) a été développé et appliqué à une machine de référence de 10 kW. Le modèle géométrique et de calcul du rendement a été validé sur cette machine de référence. Il convient de préciser que les valeurs issues des données génériques utilisées ne sauraient refléter avec précision la réalité d'une conception particulière dans une usine spécifique, il s'agit au mieux de moyennes ou d'ordres de grandeur, cette remarque est vraie pour toutes études de ce type. Les résultats d'une ACV ont vocation à établir des ratios pour une machine donnée ou à faire des comparaisons entre des solutions alternatives.

Les résultats montrent que la phase de construction et d'usage sont les phases les plus impactantes dans le cycle de vie de la machine. L'impact de la fin de vie de la machine est très faible sur tous les critères sauf un, la pollution de l'eau douce, qui est lié à la part de métaux non recyclés dans la machine. Les impacts environnementaux produits sur la phase de construction sont constants, pour une machine donnée et

essentiellement proportionnelles à la quantité de matière utilisée. Ceux produits sur la phase d'usage dépendent directement de l'énergie perdue. Ils sont alors variables en fonction du temps de fonctionnement cumulé sur la durée de vie mais aussi du mix électrique de la zone géographique d'usage.

Des exemples illustratifs de choix et de dimensionnement de machines standards ont été présentés en fonction du type de service et du temps de fonctionnement associé. En prenant en compte l'ensemble du cycle de vie, la contribution relative non négligeable de chaque partie de la machine (active ou inactive) à l'impact environnemental global qui intervenait lors du cycle de vie total (soit : fabrication, usage, démantèlement et recyclage) a été montré. Pour chaque critère d'impact, il existe une première zone, à faible temps d'usage, où la phase de construction est dominante et, donc, où la réduction de l'impact environnemental passe uniquement par l'optimisation de la masse de la machine. De même, il existe une deuxième zone, à fort temps d'usage, où la phase d'usage est dominante et, donc, où l'accroissement de l'efficacité énergétique de la machine est essentiel. Entre ces deux zones il y a une zone intermédiaire où les contributions de chaque phase sont proches et l'amélioration environnementale passe par une optimisation sur le cycle de vie total.

Afin d'améliorer l'écobilan global de la machine électrique retenue, représentative de celles qui sont largement utilisées dans l'industrie, les infrastructures et le secteur domestique, des solutions innovantes ont été envisagées en collaboration étroite avec des partenaires industriels. L'utilisation d'une nouvelle technologie du bobinage thermocollé à base d'un fil polymérisé par UV sans aucun solvant est une première piste d'amélioration. Celle-ci est étudiée et comparée au bobinage imprégné traditionnel qui utilise des vernis dilués dans des solvants. Deux types d'essais comparatifs ont été réalisés sur des échantillons d'éprouvettes ou de bobines statoriques ; un essai de test de force de collage pour mesurer le pouvoir agglomérant et s'assurer de la cohésion des bobinages thermocollés, et un essai de test de décharges partielles pour mesurer le seuil d'apparition des décharges partielles PDIV afin de vérifier la tenue des nouveaux fils aux contraintes électriques. Une évaluation comparative de type d'ACV a ensuite été conduite sur les deux types de bobinage en utilisant des données génériques et d'autres spécifiques (industrielles). En tenant compte des essais et évaluations, le nouveau fil émaillé sans solvant et thermocollable se révèle meilleur, tant du point de vue de la force de collage que de la tenue aux décharges partielles, en plus d'être moins impactant du point de vue environnemental.

Une deuxième solution innovante a aussi été exploitée dans cette thèse, il s'agit d'une nouvelle structure magnétique décalée utilisant des tôles à Grains orientés (GO) à hautes performances et habituellement utilisées dans les transformateurs. Cette structure a été développée et optimisée récemment au sein du laboratoire LSEE. Des essais menés sur des couronnes et des moteurs statiques ont montré la possibilité de réduire les pertes fer de 30 % à 50 %, et ainsi accroître le rendement de la machine. Le coût environnemental supplémentaire de ces tôles magnétiques GO durant la fabrication est estimé à 40 % après expertise. Une première estimation a minima des bénéfices globaux, déduite en considérant le minimum du gain de rendement, montre un gain environnemental positif selon tous les critères d'impact à la faveur de l'utilisation ces tôles GO à la place de tôles conventionnelles à Grains Non Orientés (NO). Deux autres pistes ont été envisagées ; l'utilisation de roulements éco-énergétiques déjà existants dans le commerce et le remplacement des composants en plastique pétrolier actuellement utilisé dans la construction des machines électriques par des plastiques à base de bio-polymères. En collaboration avec des partenaires chimistes, trois bio-polymères ont été proposés et étudiés (l'acétate de cellulose, l'acétate butyrate de cellulose et le Gaïalène). Leurs diverses caractéristiques techniques ont été comparées à celle du produit de référence (le polypropylène). La comparaison montre la possibilité de remplacer le polypropylène par l'un de ces bio-polymères en respectant les exigences techniques de fonctionnement.

Au final, les diverses solutions d'améliorations, ont été implémentées sur le prototype d'une machine électrique de même puissance que celle de la machine de référence (10kW). Le prototype du moteur à faible impact environnemental est ainsi fabriqué à base de tôles GO, de fil émaillé UV sans solvant, de plastique d'origine végétale pour la pièce du ventilateur et enfin de roulements SKF éco-énergétiques. La réalisation du prototype a donc été dictée par le souci de réduire au maximum son empreinte environnementale en utilisant des matériaux plus respectueux de l'environnement mais aussi en augmentant son efficacité énergétique (consommation électrique moindre à puissance mécanique délivrée donnée). Après livraison, le prototype a subi une série de tests normalisés en parallèle avec le moteur de référence afin de comparer ses performances

énergétiques. Le moteur éco-conçu possède une haute éco-efficacité énergétique, son rendement est augmenté de l'ordre de 3 points par rapport au moteur standard de référence et ceci sans augmenter sa masse. De plus, il comporte des éco-matériaux qui n'utilisent pas de solvant ni de produits issus du pétrole. Cela permet d'améliorer son écobilan global jusqu'à 14 % selon certains critères d'impacts. Ce moteur de classe initiale IE1 pourrait passer à classe IE3 en termes de rendement, sachant que les moteurs de classe IE1 ne pourront bientôt plus être commercialisés en Europe, ce qui est déjà le cas en Amérique du Nord. En outre, produire en série cette machine pourra être économiquement rentable car le surcoût initial, est estimé à 15 % du prix du moteur standard ; il peut être amorti au maximum après 2 ans d'usage en cycle continu (8 heures de travail par jour). Etant donné les très grandes quantités de moteurs mises en jeu, l'amélioration des performances environnementales de chaque unité apporte donc des gains environnementaux conséquents.

Afin de réduire d'avantage les impacts environnementaux générés par ce prototype, il sera intéressant d'étudier la possibilité de fabriquer un moteur sans peinture et de remplacer l'aluminium par le cuivre dans la cage rotorique. Ce travail décrit dans ce manuscrit peut être traduit dans un 'toolbox', appelé écobilan, à incorporer dans les logiciels de conception chez les fabricants des machines électriques qui permet d'aider les ingénieurs à prendre le meilleur choix dès la conception afin de réduire les impacts environnementaux produits. Il est à noter que la démarche d'éco-conception a été menée sur une machine asynchrone connectée directement au réseau. Ce travail ouvre des perspectives sur une étude plus large qui considère les machines alimentées par MLI, ce qui nécessite la prise en compte des convertisseurs et les câblages dans la réalisation de l'écobilan. Toutes les pistes d'amélioration proposées nécessitent aussi une caractérisation approfondie afin de réduire nettement les contraintes électriques pour le nouveau bobinage à base fil UV et d'améliorer les performances énergétiques pour le circuit magnétique GO à haute fréquence.

Annexes

Annexe A

Description des processus & critères d'impact environnemental

1. Processus de fabrication industriel

i. Processus standards

Il existe dans les bases de données telles qu'Ecoinvent un nombre important de matériaux et processus standards liés à la fabrication des pièces constituant la machine électrique. Le Tableau A - 1 résume les différents matériaux et processus de fabrication qui ont été choisis lors de la démarche d'éco-conception de la machine de référence.

Tableau A - 1. Données relatives au processus de fabrication des composants de la machine de référence extraites de la base de données Ecoinvent

N°	Composant de la machine	Matériaux		Processus
		Type	Élément choisi de "Ecoinvent"	Élément choisi de "Ecoinvent"
1	Cage d'écureuil	Aluminium	"Aluminum production mix at plant/RER U"	"Section bar extrusion/ RER U"
2	Carcasse de fixation	Acier	"Steel low alloyed, at plant/RER U"	"Cold impact extrusion, 1 stroke/RER U"
3	Boîte à bornes	Aluminium	"Aluminum production mix at plant/RER U"	"Section bar extrusion/ RER U"
4	Capot ventilateur	Acier	"Steel low alloyed, at plant/RER U"	"Cold impact extrusion, 1 stroke/RER U"
5	Ventilateur	Plastique	"Polypropylene Granulate/RER U"	"Injection moulding/RER U"
6	Tôles magnétiques NO	Acier	"Steel low alloyed, at plant/RER U"	"Sheet rolling, steel/RER U"
		Silicium	"MG-silicon, at plant/RER U"	
7	Bobinage et Imprégnation	Cuivre	"Copper primary, at plant/RER U"	"wire drawing copper/RER U"
		Polyester-imide	"Polyester resin unsaturated/ RER U" – 50%	"Electricity medium voltage, UCTE"
			"Phtalic anhydride/RER U" – 50 %	
		Polyamide-imide	"Methylene diphenol diisocyanate/ RER U" – 50 %	
			"Phtalic anhydride/RER U" – 50 %	
		Solvent aromatique	"Xylene at plant" – 25 %	
			"N-methyl-2-pyrrolidone /RER U" – 25%	
			"Phenol at plant/RER U" – 25%	
			"Methylforrate at plant/RER U" – 25 %	
		Vernis d'imprégnation	"Polyester resin unsaturated/ RER U"	
	Solvants Aromatiques			

Chaque matériau ou processus utilisé dans l'ACV fait appel un flux entrant des matières premières et des ressources consommées de façon directes ou indirectes, et un flux sortant des rejets et des émissions dans l'air/l'eau/le sol. A titre d'exemple, on présente ci-dessous un exemple des flux entrants et sortants liés à un 1 kg de cuivre primaire utilisé dans la fabrication du bobinage du moteur électrique. Des chiffres extraits de Simapro (version 2.7) incluant la base Ecoinvent (version 2.1 mise à jour en juillet 2009) donnent les quantités utilisées de charbon, de gaz et de l'uranium pour produire 1 MJ de l'électricité basse tension en France et en Europe.

Exemple 1 – Données relatives à un 1 kg de cuivre primaire

Les valeurs des énergies présentées ci-dessous représentent bien les valeurs des énergies à la consommation finale, c'est-à-dire pour déduire l'énergie primaire consommée, il faut remonter à la production.

Flux entrants (matières et ressources)		Copper, primary 1 kg	Emissions dans l'air	Emissions dans l'eau	Traitement de déchets
Natural gas, burned in industrial furnace >100kW 3,7 MJ	Electricity, high voltage, production UCTE 0,21 kWh			Antimony 5,5 e-6 kg Arsenic 3.2 e-5 kg Cadmium 6.5 e-6 kg Carbon dioxide, fossil 0,11 kg Carbon monoxide, fossil 3 e-5 kg Chromium 5e-8 kg Copper 25 e-5 kg Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin 2e-12 kg Heat, waste 197 MJ Lead 15 e-5 kg Manganese 15 e-6 kg Mercury 1e-07 kg Selenium 5,5 e-6 kg Sulfur dioxide 0,0357 kg Tin 6,2 e-6 kg Vanadium 3,75 e-7 kg Zinc 0,00015 kg	Arsenic, ion 1,8 e-7 kg Cadmium, ion 1,58 e-8 kg Chromium, ion 1,66 e-7 kg Copper, ion 3,05 e-7 kg Lead 9,26 e-8 kg Mercury 1,66 e-7 kg Nickel, ion 1,23 e-7 kg Tin, ion 1,66 e-7 kg Zinc, ion 4,91 e-7 kg
Oxygen, liquid 0,3 kg	Electricity, hydropower 0,32 kWh				
Silica sand 0,75 kg	Anode, aluminium electrolysis 0,001 kg				
Limestone, milled, packed 0,25 kg	Non-ferrous metal smelter 1.1e-11 pièce				
Heavy fuel oil, burned in industrial furnace 1MW 4,53 MJ	Copper concentrate 4,14 kg				

Exemple 2 – Données relatives à la production de 1 MJ de l'électricité basse tension en France et en Europe.

	1 MJ / électricité de d'origine française	1 MJ / électricité d'origine européenne
Gaz naturel	9 .10 ⁻³ m ³	53,5 .10 ⁻³ m ³
charbon 'brown'	1,25. 10 ⁻³ kg	213 .10 ⁻³ kg
'hard'	31. 10 ⁻³ kg	118 .10 ⁻³ kg
Uranium	2,12 10 ⁻⁵ kg	0,845.10 ⁻⁵ kg

Exemple 3 sur la méthodologie d'agrégation – A partir de la méthode d'agrégation CML retenue (version 2.05), on extrait les données de ressources épuisables pour en faire une équivalence en Sb :

- Uranium: 2,87.10⁻³ kg Sb éq / kg
- Gaz naturel : 1,87.10⁻² kg Sb éq / kg
- Charbon 'brown': 6,71.10⁻³ kg Sb éq / kg
- Charbon 'hard': 1,34 .10⁻² kg Sb éq / kg

ii. Processus spécifique d'expertise : émaillage et imprégnation

Le fil émaillé est un fil de cuivre ou d'aluminium principalement utilisé pour les bobinages à spires jointives. L'émail est en fait un isolant très résistant sur le plan mécanique, thermique et électrique. En plus de l'émail ordinaire, il existe de l'émail soudable en polyuréthane qui convient bien pour les fils de très petit diamètre (à partir de 0,05 mm). Le décapage se produit vers les 350-450 °C. Les fabricants de fil émaillé reçoivent un fil ébauche de diamètre 8 mm puis le tréfilent à un diamètre intermédiaire. A ce stade, le fil est recuit par effet joule

pour lui apporter les propriétés mécaniques nécessaires à la transformation et à l'émaillage. Chaque machine à émailler est équipée de sa propre tréfileuse pour l'amener au diamètre voulu ainsi que d'un four de recuit car, à chaque opération de tréfilage, le fil se durcit et se salit ; il faut donc modifier sa cristallinité en le recuisant.

Pour les diamètres compris entre 0,05 mm et 0,8mm, l'émaillage est réalisé dans des fours horizontaux qui ont une longueur comprise entre 3 et 10 m. L'application du vernis est réalisée par des feutres pour des diamètres jusque 0,3 mm et par filières pour des diamètres compris entre 0,25 et 0,8 mm. Pour les fils de cuivre > 1 mm jusqu'au méplat, l'émaillage s'effectue dans des fours verticaux de 15 à 25 m de haut et l'application du vernis est en général réalisée par filières. Afin d'obtenir une très bonne adhésion et avoir de grandes vitesses de défilement, il est nécessaire d'appliquer de très fine couches. C'est ainsi qu'il n'est pas rare d'avoir des applications avec 10 à 20 passages dans le bac de vernis avec et autant de passages dans le four d'émaillage.

Dans la première partie du four, les solvants des vernis sont évaporés puis brûlés sur des catalyseurs pour d'une part éviter le rejet à l'atmosphère et, d'autre part, pour utiliser l'énergie de la combustion pour chauffer le four. Dans la seconde partie du four, le vernis est polymérisé (estérification ou polycondensation). Enfin, dans la dernière partie le fil doit être refroidi par de l'air pulsé avant d'arriver aux poulies de renvoi car les températures dans le four peuvent atteindre 750°C. La Figure A. 1 résume les divers processus de fabrication d'un fil émaillé classique en précisant des chiffres d'expertise liés à chaque étape de fabrication.

Le fil émaillé fabriqué est ainsi utilisé dans le bobinage des moteurs électriques qui sont ultérieurement imprégnés par des vernis à base de solvants. Le processus d'imprégnation nécessite, en premier lieu, de faire le vide pour éliminer le maximum d'air au cœur du bobinage, d'injecter le vernis sous vide puis de mettre l'ensemble sous pression. En second lieu, le moteur doit être polymérisé dans une étuve à haute température. Il est possible d'estimer la quantité d'énergie nécessaire pour cette opération après le procédé d'imprégnation à l'aide de la relation suivante :

$$Q = m.c_m.\Delta T \quad (\text{A.1})$$

Où Q est l'énergie thermique en Joule, m , la masse de la substance en grammes, ΔT , la variation de température en degrés Celsius, et c_m , la chaleur massique (aussi appelée capacité thermique massique) de la substance. L'unité de la chaleur massique est le J/kg. °C. Cela implique que la phase d'imprégnation nécessite d'environ 6,75 MJ d'énergie ($1,3 \times (16,81+22,29+3,91) \times 10^3 \times (0,45+0,383) \times (165-20) = 6,75 \text{ MJ}$).

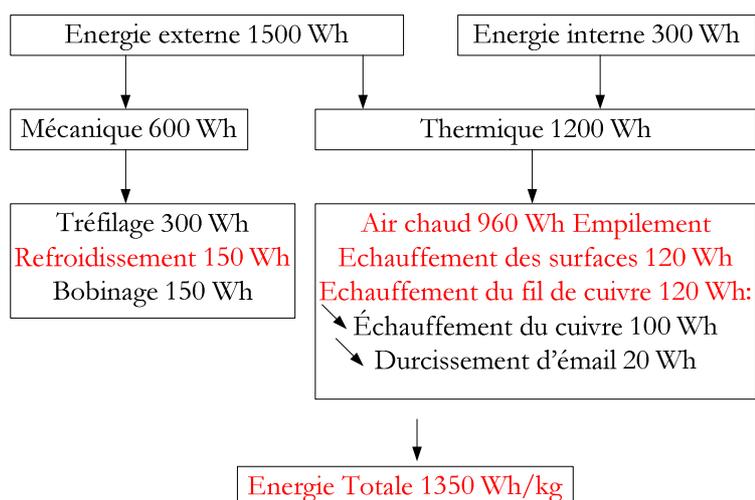


Figure A. 1. Processus de fabrication du fil émaillé (Frezel, P – GII & ACEBSA²)

² GII & ACEBSA: partenaire de Projet MEDEE 3.2 dans le quel s'inscrit cette thèse

Annexe B

Modélisation de la machine asynchrone à partir de sa géométrie

1. Relations analytiques nécessaires à la conception

Le moteur asynchrone à cage est constitué d'un stator et d'un rotor, le stator formé de tôles magnétiques feuilletées et un enroulement triphasé logé dans les encoches et le rotor donné de tôles magnétiques feuilletées, avec une cage composée de barres court-circuitées par des anneaux. Les deux premiers paramètres sont la longueur active du circuit magnétique et le diamètre d'alésage. Ces paramètres constituent la relation fondamentale de dimensionnement de la machine électrique [93].

$$P_s = \frac{60.n}{8,6.10^{-6}} \cdot (d_{is}^2 \cdot L_a) \cdot k_b \cdot B_\delta \cdot A_1 \quad (B.1)$$

P_s est la puissance apparente, n la vitesse de la machine en tr/min, k_b le coefficient de bobinage, $A_1 = q_s \cdot 2N_s \cdot I / \pi d_{is}$ la densité linéique du courant.

Toutes les autres dimensions sont déduites de ces deux paramètres. Le programme de calcul géométrique utilise les caractéristiques souhaitées de la machine, des coefficients divers pour garder l'aspect réel de la géométrie et les inductions magnétiques dans les différentes parties du circuit magnétique de la machine; la culasse et les dents, au rotor comme au stator. Ce dernier intervient comme contrainte imposée par l'hypothèse de linéarité de la modélisation magnétique de la machine. En sortie de ce modèle, nous obtenons les dimensions géométriques et le nombre de spires par phase (cf. Figure B. 1).

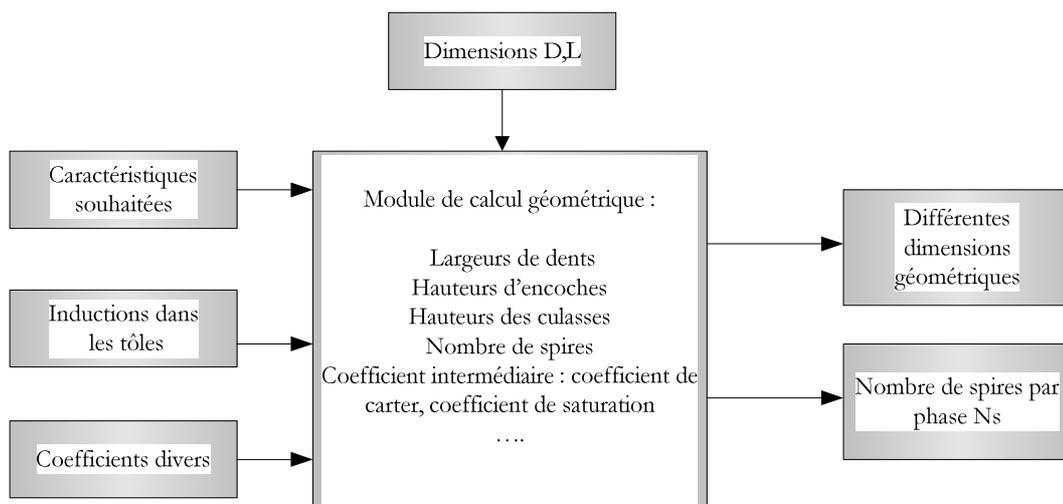


Figure B. 1. Schéma synoptique du modèle géométrique

Inductions dans les tôles magnétiques – Dans les couronnes du stator, les valeurs usuelles de l'induction sont de 1.4 à 1.6 T. On rencontre couramment 1.8 T dans les corps des pôles du rotor et jusqu'à 2.2 T dans les

parties les plus étroites des dents du stator. Les chiffres indiqués correspondent au fonctionnement en charge de la machine et à des tôles aux siliciums laminés à chaud (induction de saturation voisine de 1.5 T). L'emploi de tôles à 25 % de cobalt, se saturent aux environ de 2.2 T permet d'admettre des inductions plus élevées d'environ 50%. Malheureusement ces alliages (exemple: AFK 1 de métal IMPHY) sont si chers que leur emploi se trouve limité au matériel aérospatial où la réduction de masse est primordiale [156].

Dans la littérature [99], les inductions dans les tôles ordinaires à grains non orientés utilisées pour les moteurs électriques de petites et moyennes puissances sont affichées dans le Tableau B - 1. La perméabilité relative (μ_r) de tôles utilisées vaut 10000.

Tableau B - 1. Valeurs typiques de l'induction magnétique dans le circuit magnétique

Induction dans la culasse statorique (B_{cs})	1.3 T
Induction dans la culasse rotorique (B_{cr})	1.4 T
Induction dans les dents statorique (B_{ds})	1.7 T
Induction dans les dents rotorique (B_{dr})	1.8 T

Coefficient divers – Les méthodes analytiques de calcul des machines électriques sont généralement simples à établir et d'un emploi facile. Elles ne sont applicables cependant que lorsque les géométries étudiées sont simple (encoches rectangulaires, circulaires) et lorsque la saturation des circuits magnétiques n'est pas prise en compte. Dans des cas plus complexes, les calculs analytiques ne sont possibles que si des hypothèses très simplificatrices sont effectuées. C'est la raison pour laquelle nous utilisons divers coefficients qui tiennent compte de la géométrie complexe des machines électriques et du problème du non linéarité. Nous citons les coefficients utilisés dans notre modèle géométrique.

- ✓ Les coefficients de foisonnement k_{rs} et k_{rr} qui tiennent compte de la modification du volume occupé par une matière fragmentée par inclusion d'air. L'évolution de la perméabilité en fonction de foisonnement est donnée dans la littérature [157-158], k_{rs} vaut 0,95 et $k_{rr}=1$.
- ✓ Le facteur de forme k_{cs} , k_{cr} de l'encoche statorique et rotorique qui tient en compte de la forme de l'encoche, il vaut 0.9 [96].
- ✓ Le rapport de la hauteur d'encoche sur le diamètre d'alésage δ_b , il exprime la surface du cuivre en fonction du diamètre et il varie entre 0.15 et 0.3 [99]. On prend $\delta_b = 0.15$ pour les machines de petites et moyennes puissances.
- ✓ Le rapport entre l'hauteur d'encoche statorique et rotorique k_{sr} , il est constant et inférieur à 1 [96].
- ✓ Le rapport d'épaisseur d'entrefer sur le diamètre d'alésage h_e/d_{is} , est compris entre 0.0007...0.001 où la valeur inférieure se rapporte aux machines courtes.

i. Dimensions géométriques

On rappelle de la géométrie de notre machine de référence étudiée sur la Figure B. 2 à partir de laquelle on calcule les différentes dimensions géométriques.

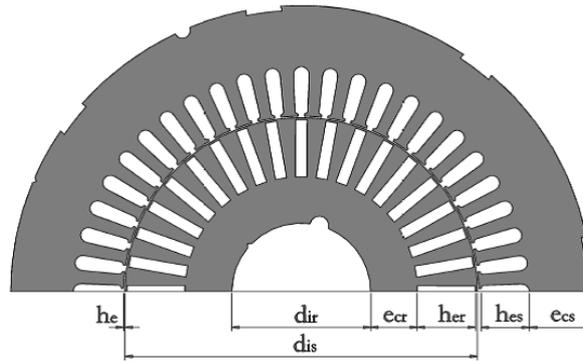


Figure B. 2. Géométrie de la machine étudiée

Hauteurs d'encoches – On note par d_{is} le diamètre d'alésage, h_{es} et h_{er} respectivement les hauteurs d'encoches statoriques et rotoriques, donc:

$$h_{es} = \gamma_h \cdot d_{is} \quad ; \quad h_{er} = k_{sr} \cdot h_{es} \quad (B.2)$$

Largeurs moyennes des dents – On note par b_{ds} et b_{dr} respectivement les largeurs de dents statoriques et rotoriques :

$$b_{ds} = \frac{B_\delta \cdot \tau_{ds}}{k_{tm} \cdot B_{ds}} \quad ; \quad b_{dr} = \frac{B_\delta \cdot \tau_{dr}}{k_{tm} \cdot B_{dr}} \quad (B.3)$$

Avec B_δ l'induction d'entrefer, $\tau_{ds} = \pi \cdot (d_{is} + h_{es}) / Z_{es}$ le pas dentaire moyen statorique, $\tau_{dr} = \pi \cdot (d_{er} + h_{er}) / Z_{er}$ le pas dentaire moyen rotorique, k_{tm} le coefficient de foisonnement.

Largeurs moyennes d'encoches – On note par b_{es} et b_{er} respectivement les largeurs moyennes d'encoches statoriques et rotoriques, on a donc:

$$b_{es} = \tau_{ds} - b_{ds} \quad ; \quad b_{er} = \tau_{dr} - b_{dr} \quad (B.4)$$

Épaisseur des culasses – On note par e_{cs} et e_{cr} l'épaisseur des culasses statorique et rotorique,

$$e_{cs} = \frac{\alpha_i \cdot \tau_p \cdot B_\delta}{2 \cdot k_{tm} \cdot B_{cs}} \quad ; \quad e_{cr} = \frac{\alpha_i \cdot \tau_p \cdot B_\delta}{2 \cdot k_{tm} \cdot B_{cr}} \quad (B.5)$$

Avec $\tau_p = \pi \cdot d_{is} / 2 \cdot p$ le pas polaire et $\alpha_i = k_s \cdot 2 / \pi$ le facteur d'aplatissement de l'onde d'induction qui dépend du coefficient de saturation $k_s \geq 1$.

Longueur moyenne d'une demi-spire – Pour un enroulement basse tension, la longueur d'une demi-spire statorique est donnée par :

$$l_{sp} = L_a + k_{lco} \cdot \tau_{ds} \cdot S_e \quad (B.6)$$

S_e est l'ouverture de la bobine en encoches et k_{lco} le facteur de correction tenant compte de la géométrie (> 1). Sachant que n_b est le nombre de bobines en parallèle sur une phase, la longueur totale du fil conducteur utilisé dans le bobinage de la machine l_b est donc :

$$l_b = 2 \cdot n_b \cdot N_s \cdot q_s \cdot l_{sp} \quad (B.7)$$

Largeur de l'anneau de court-circuit – La largeur d'anneau b_a est généralement choisie petite. Par contre, sa hauteur h_a est plus grande afin d'augmenter sa surface de refroidissement.

$$h_a \cong 2.h_{es} \quad ; \quad b_a = c_a.h_{es} \quad (B.8)$$

c_a est facteur inférieur à 1.

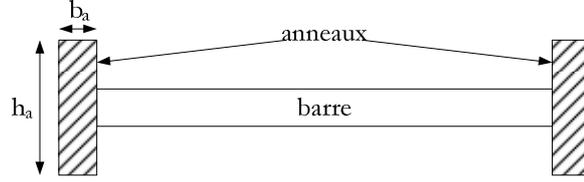


Figure B. 3. Illustration de la hauteur et de la largeur de l'anneau

ii. Coefficients intermédiaires

Coefficient de bobinage – Par définition k_b est le produit du facteur de distribution et du facteur de raccourcissement [158], on a donc :

$$k_b = \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi}{2.m}\right)}{q_s \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2.m.q_s}\right)} \right] \cdot \left[\sin\left(\frac{S_e}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \right] \quad (B.9)$$

Coefficient de carter – On calcule le coefficient de carter $k_c = k_{cs} \times k_{cr}$ qui permet de modéliser de façon moyenne les effets de l'encoche stator et rotor sur la valeur de l'inductance magnétisante [94]. Les coefficients de carter statorique et rotorique sont donc :

$$k_{cs} = \frac{\tau_{ds}}{\tau_{ds} - \left(\frac{\left(\frac{b_{ds}}{h_e}\right)^2}{\left(5 + \left(\frac{b_{ds}}{h_e}\right)\right)} \right) h_e} \quad ; \quad k_{cr} = \frac{\tau_{dr}}{\tau_{dr} - \left(\frac{\left(\frac{b_{dr}}{h_e}\right)^2}{\left(5 + \left(\frac{b_{dr}}{h_e}\right)\right)} \right) h_e} \quad (B.10)$$

Coefficient pour ramener au stator les impédances – Dans [95] page 150 et [96] page 33, le nombre de spires rotoriques en série N_r par phase et par pôle est considéré égal à $\frac{1}{2}$ dans le cas de rotors à cage. Donc, le rapport de transformation stator /rotor K est calculé avec :

$$K = \frac{q_s \cdot (N_s \cdot k_b)^2}{Z_{er} \cdot (N_r \cdot k_{br})^2} \quad (B.11)$$

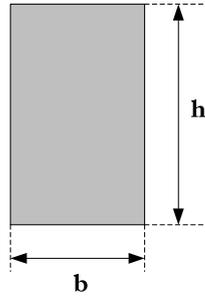
k_{br} est le coefficient de bobinage du rotor qui vaut 1 dans le cas du rotor à cage.

Coefficient d'inclinaison – Ce coefficient k_i tient en compte l'effet de l'inclinaison des barres du rotor, d'après le calcul issus de [94], on a :

$$k_i = \frac{\sin\left(p \cdot \pi \cdot \frac{k_{ir}}{Z_{er}}\right)}{\left(p \cdot \pi \cdot \frac{k_{ir}}{Z_{er}}\right)} \quad (\text{B.12})$$

k_{ir} est la valeur de l'inclinaison de la cage rotorique en pas dentaire.

Prise en compte de l'effet de peau – Les formules analytiques permettant de prendre en compte l'effet de peau n'existent que pour des conducteurs de forme particulière. La formule utilisée dans notre modèle [cf. expression (B.43) et (B.45)], est valable pour une encoche de la forme suivante :



Le coefficient ε_p qui tient compte de l'effet de peau au rotor est donnée par la formule issue de [159].

$$\varepsilon_p = h \cdot \sqrt{\left(\pi \cdot \mu_0 \cdot \frac{g \cdot f}{\rho_{al}}\right)} \quad (\text{B.13})$$

Coefficient de l'effet de peau pour les résistances – il est donné par :

$$k_{ep} = \varepsilon_p \cdot \frac{sh(2 \cdot \varepsilon_p) + \sin(2 \cdot \varepsilon_p)}{ch(2 \cdot \varepsilon_p) - \cos(2 \cdot \varepsilon_p)} \quad (\text{B.14})$$

Coefficient de l'effet de peau pour les réactances – il est donné par :

$$k_x = \frac{3}{(2 \cdot \varepsilon_p)} \cdot \frac{sh(2 \cdot \varepsilon_p) - \sin(2 \cdot \varepsilon_p)}{ch(2 \cdot \varepsilon_p) - \cos(2 \cdot \varepsilon_p)} \quad (\text{B.15})$$

iii. Calcul du nombre de spires

Le nombre de spires en série, par phase au stator est déterminé en connaissant la tension induite et le flux principal crée par une phase statorique. La tension par phase aux bornes du stator V_s est supérieure à la tension induite E_μ telle que $E_\mu = k_a \cdot V_s$ où k_a est le facteur tenant compte de la chute de tension provoquée par la réactance de fuite statorique et par la résistance de la phase statorique, ($k_a = 0.8$ à 0.98) [96].

$$E_\mu = k_a \cdot \langle \phi_e \rangle \cdot f \cdot N_s \quad (\text{B.16})$$

$k_a = k_b \cdot \frac{\pi}{\sqrt{2}}$ - coefficient de Kapp, $\langle \phi_e \rangle = \frac{2}{\pi} \cdot S_p \cdot B_\delta$ - flux magnétique dans l'entrefer, $S_p = \frac{\pi \cdot d_{is} \cdot L_a}{2p}$ - surface polaire. Le nombre de spires, par phase N_s , est donc:

$$N_s = \frac{E_\mu}{k_a \cdot f \cdot \langle \phi_e \rangle} \quad (\text{B.17})$$

2. Données relatives à la machine de référence

On présente ci-dessous les diverses données réelles relatives à la machine de référence qui ont été utilisées dans le calcul analytique précédent et les divers coefficients de dimensionnement qui sont aussi déduits de ce calcul. Toutes ces données ont fait l'objet d'une recherche bibliographique dans la littérature scientifique liée à la conception des machines électriques tournantes.

Tableau B - 2. Données relatives à notre machine de référence calculées à l'aide de la littérature scientifique liée au dimensionnement des machines tournantes

Description	Symbole	Valeur	Description	Symbole	Valeur
densité linéique du courant (A/mm)	A_l	60,2	coefficient de carter	k_c	2,09
induction dans la culasse rotorique (T)	B_{er}	1,4	coefficient de l'effet de peau de résistances	k_{ep}	1,006
induction dans la culasse statorique (T)	B_{es}	1,3	coefficient de l'effet de peau de réactances	k_{ex}	0,084
induction dans les dents rotoriques (T)	B_{dr}	1,8	facteur de forme de l'encoche rotorique	k_{er}	0,9
induction dans les dents statoriques (T)	B_{ds}	1,7	facteur de forme de l'encoche statorique	k_{es}	0,9
induction d'entrefer (T)	B_δ	1	coefficient d'inclinaison des barres rotoriques	k_i	0,98
couple de frottement sec (N.m)	c_0	0,99	facteur de correction tenant compte de la géométrie	k_{lo}	0,97
couple d'accélération moyen de la machine (N.m)	C_a	60,8	coefficient de remplissage d'encoche rotorique	k_{rr}	1
coefficient de charge (N.m/rd2s-2)	k_{ch}	$2,91 \cdot 10^{-3}$	coefficient de remplissage d'encoche statorique	k_{rs}	0,501
pertes par courants de Foucault ($W \cdot kg^1 \cdot s^{-1} \cdot T^{-2}$)	C_{CF}	$0,2 \cdot 10^{-3}$	coefficient de saturation	k_s	1,1
couple électromagnétique (N.m)	C_e	66,3	rapport entre les hauteurs d'encoches statorique et rotorique	k_{sr}	1
coefficient de pertes par excès ($W \cdot kg^1 \cdot s^{3/2} \cdot T^{3/2}$)	C_{exc}	$3 \cdot 10^{-3}$	coefficient de foisonnement des tôles magnétiques	k_{im}	0,98
pertes par hystérésis statique ($W \cdot kg^1 \cdot s^{-1} \cdot T^{-2}$)	C_{hyst}	0,02	coefficient de chute de tension au stator	k_u	0,95
couple de pertes mécaniques du banc d'essais (N.m)	c_p	4,35	longueur active du circuit magnétique (mm)	L_a	179
diamètre équivalent de fil de cuivre (mm)	d_{cu}	1,34	nombre d'encoches par pôle et par phase	m	4
diamètre extérieur rotorique (mm)	d_{er}	122,25	vitesse nominale de la machine (tr/min)	n	1440
diamètre extérieur statorique (mm)	d_{es}	200	nombre de bobines en parallèle.	n_b	2
diamètre intérieur rotorique (mm)	d_{ir}	47,8	nombre de spires rotoriques équivalent par phase et par pôle	N_r	1/2
diamètre intérieur statorique (mm)	d_{is}	122,55	nombre de spires en série par phase	N_s	184
épaisseur de la tôle magnétique (mm)	e_{tm}	0,65	puissance nominale du moteur (kW)	P_n	10
coefficient de frottement aérodynamique (N.m/rd s^{-1}) ²	f	$0,17 \cdot 10^{-3}$	puissance apparente (kVA)	P_s	14,5
coefficient de frottement visqueux (N.m/rd s^{-1})	f_g	0,048	masse volumique de l'aluminium (kg/m ³)	Q_{al}	2700
fréquence statorique (Hz)	f_s	50	masse volumique du cuivre (kg/m ³)	Q_{cu}	8900
glissement nominal de la machine	g	0,04	masse volumique du fer électrique (kg/m ³)	Q_f	7800
hauteur d'entrefer (mm)	h_e	0,3	nombre de phases statorique	q_s	3
courant de démarrage du moteur pressenti (A)	I_d	200	coefficient de bobinage	k_b	0,95
courant nominal du moteur (A)	I_n	21	coefficient du bobinage rotor	k_{br}	1
moment d'inertie du banc d'essais (kg.m ²)	J	0,17	résistance de l'induit de la MCC (Ω)	r_i	0,75
inertie de la machine de référence (kg.m ²)	J_0	0,031	ouverture de la bobine en encoches	S_e	12
coefficient de transformation	K	$10,4 \cdot 10^3$	nombre d'encoches rotoriques	Z_{er}	36

<i>stator/ rotor</i>					
<i>coefficient de la proportionnalité de la MCC (V/ (rd/s)⁴)</i>	k_e'	1,48	<i>coefficient d'aplatissement</i>	a_i	0,7
<i>nombre d'encoches statoriques</i>	Z_{es}	48	<i>perméabilité relative de fer électrique NO (H)</i>	μ_r	10000
<i>perméabilité du vide (H/m)</i>	μ_0	$4\pi 10^{-7}$	<i>résistivité de l'aluminium de la cage rotorique ($\Omega.m$)</i>	ρ_{al}	3.10^{-8}
<i>pas polaire statorique (m)</i>	τ_p	0,09	<i>résistivité de cuivre ($\Omega.m$)</i>	ρ_c	$1,8.10^{-8}$
<i>pulsation statorique (rd/s)</i>	ω_s	314	<i>vitesse rotorique (rd/s)</i>	Ω	150,7
<i>valeur de l'inclinaison des barres du rotor (m)</i>	k_{ir}	0,01	<i>coefficient qui tient compte de l'effet de peau</i>	ε_p	0,29

3. Calcul des masses inactives de la machine

Les différents composants constituant la partie inactive de machine électrique de référence 10 kW sont résumés dans le Tableau B - 3. Dans notre étude d'éco-conception de la machine électrique, les calculs de masse de tous ces composants doivent être estimés à partir de la structure géométrique illustrée dans la Figure B. 2. Cela implique d'estimer la masse de la partie inactive à partir de la géométrie de la partie active. La plupart des relations qui ont été utilisées dans cette étape sont issues des formules de [8], page 256.

Tableau B - 3. Composition des parties inactives constitutives d'une machine asynchrone de référence

Partie	Matériau
Carter	Acier
Pieds de maintien	Acier
Ailettes	Acier
Flasques	Acier
Arbre	Acier
Roulements	Acier
Ventilateur	Plastique
Capot du ventilateur	Acier
Boite à bornes	Aluminium
Vernis d'imprégnation	Polyester & solvants
Isolation électrique	Nomex

Masse de châssis – le volume du carter :

$$V_{\text{carter}} = \frac{\pi}{4} \cdot \left[(d_{es} + 2.e_{\text{carter}})^2 - d_{es}^2 \right] \cdot L_{\text{carter}} \cdot k_{im} \quad (\text{B.18})$$

$L_{\text{carter}} = L_a + 2.h_{es}$ est la longueur du carter. e_{carter} est choisi selon le critère de tenue mécanique [160]. Sur le châssis de la machine, le constructeur monte 10 ailettes de chaque côté pour accroître les échanges thermiques avec l'air. Le volume total des ailettes est donné par la relation suivante:

$$V_{\text{aillette}} = 4.10.k_{im}.L_{\text{carter}}.h_{\text{aillette}}.e_{\text{carter}} \quad (\text{B.19})$$

h_{aillette} est la hauteur d'aillette. Le volume des flasques de fermeture est donc :

$$V_{\text{flasque}} = \frac{\pi}{4} \cdot \left[(d_{es} + 2.e_{\text{carter}})^2 - d_{ir}^2 \right] \cdot e_{\text{carter}} + \frac{\pi}{4} \cdot \left[(d_{es} + 2.e_{\text{carter}})^2 - d_{es}^2 \right] \cdot b_{\text{flasque}} \quad (\text{B.20})$$

b_{flasque} est la largeur du flasque. Le volume du pied du maintien est donné par l'expression suivante [8] :

$$V_{\text{pied}} = \left[\frac{(d_{es} + e_{\text{carter}})^2}{18} \right] \cdot L_a \cdot k_m \quad (\text{B.21})$$

La masse totale du châssis est alors :

$$M_{\text{carter+flasque+pied}} = (V_{\text{carter}} + V_{\text{aillette}} + 2 \cdot V_{\text{flasque}} + V_{\text{pied}}) \cdot \rho_f \quad (\text{B.22})$$

Masse de l'arbre et des roulements – la masse de l'axe rotorique vaut:

$$M_{\text{axe}} = \frac{\pi}{4} \cdot d_{\text{ir}}^2 \cdot l_{\text{axe}} \cdot \rho_f \quad (\text{B.23})$$

l_{axe} est la longueur de l'axe du rotor. La masse du roulement est donnée en fonction de diamètre intérieur rotorique (cf. [75]).

Masse du capot de ventilateur – On note par l_{capot} la longueur du capot de ventilation, donc :

$$M_{\text{capot}} = \frac{e_{\text{carter}}}{4} \cdot \left[\frac{3\pi}{2} \cdot l_{\text{capot}} \cdot (d_{es} + 2 \cdot e_{\text{carter}}) + \frac{\pi}{4} \cdot (d_{es} + 2 \cdot e_{\text{carter}})^2 \right] \cdot \rho_f \quad (\text{B.24})$$

Masse de boîte à bornes – Soient l_b , h_b et e_b respectivement la longueur, la hauteur et l'épaisseur de la boîte à bornes, donc :

$$M_{\text{boîte}} = (l_b^2 + 4 \cdot l_b \cdot h_b) \cdot e_b \cdot \rho_{al} \quad (\text{B.25})$$

La masse du ventilateur est donnée par l'expression suivante:

$$M_{\text{ventilateur}} = \chi \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (d_{es}^2 - d_{\text{ir}}^2) \cdot e_{\text{vent}} \cdot \rho_{pl} \quad (\text{B.26})$$

χ est le coefficient de réglage, e_{vent} est l'épaisseur du ventilateur, ρ_{pl} est la masse volumique du plastique.

Masses des isolants – Le fil du bobinage dans un moteur électrique est isolé par deux couches de base, polyester imide et polyamide imide d'épaisseur normalisée [161]. Pour un fil de diamètre 0.95 mm et de grade 2B, l'accroissement minimal de la sous-couche est de, 63 μm .

$$M_{\text{iso}} = a_1 \cdot a_2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left[(d_{cu} + e_{\text{iso}})^2 - d_{cu}^2 \right] \cdot l_b \cdot \rho_{\text{iso}} \quad (\text{B.27})$$

ρ_{iso} est la masse volumique d'isolant, d_{cu} est le diamètre du cuivre nu, e_{iso} est l'épaisseur de couche d'isolante, a_2 est le nombre de conducteurs en parallèle de bobinage, a_1 est le coefficient qui tient compte de la quantité perdue en cours de processus.

L'isolation du fond de l'encoche se fait par le Nomex. La quantité nécessaire pour concevoir un moteur peut être estimée comme suit :

$$M_{\text{nomex}} = Z_{es} \cdot (2 \cdot h_{es} + b_{es}) \cdot e_{\text{Nomex}} \cdot L_a \cdot k_{im} \cdot \rho_{\text{Nomex}} \quad (\text{B.28})$$

e_{Nomex} est l'épaisseur du Nomex, ρ_{Nomex} est la masse volumique de matériaux qui constitue la Nomex. La quantité du vernis d'imprégnation utilisé pour un moteur est estimée selon [162] par l'équation suivante :

$$M_{\text{vernis}} = P_n \cdot \frac{0,1}{\text{watt}} \quad (\text{B.29})$$

P_n est la puissance absorbée nominale de la machine en Watt.

4. Calcul des paramètres électriques de la machine

Ce calcul consiste à déterminer les différents paramètres électriques de la machine de référence (inductance magnétisante, divers réactances de fuites et les résistances électriques). Le schéma équivalent monophasé de la Figure B. 4 résume les divers paramètres qui caractérisent la machine électrique. La composante (X_s) est composée de la réactance de fuites d'encoche (X_{es}), de la réactance de fuites différentielle (X_{ds}) et de la réactance de fuites de tête de bobine (X_{tb}). La composante (X'_r) ramenée au stator est aussi composée de la réactance de fuites d'encoche (X'_{er}), de la réactance de fuites différentielle (X'_{dr}), de la réactance d'anneau de court-circuit (X'_{acc}) et de la réactance due à l'inclinaison (X'_{ir}).

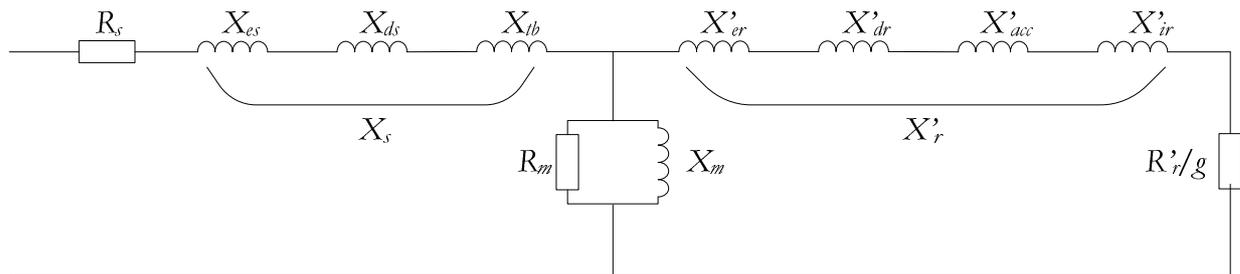


Figure B. 4. Schéma monophasé équivalent avec toutes les réactances de fuites

Hypothèses – On commence cette étude par un rappel de certaines hypothèses qui ont été considérées dans la modélisation électrique de la machine asynchrone à cage à partir de la géométrie :

- ✓ Les flux sont supposés parfaitement sinusoïdaux dans le temps et dans l'espace (modèle ne tenant compte que du terme fondamental).
- ✓ Les courants statoriques et rotoriques sont eux aussi supposés parfaitement sinusoïdaux.
- ✓ La densité de courant dans les enroulements statoriques est supposée uniformément répartie et l'on tiendra compte de l'effet de peau dans l'étude de la cage.
- ✓ Le régime permanent est uniquement considéré et pour un domaine où le circuit magnétique n'est pas saturé : fonctionnement autour du point nominal.
- ✓ Le modèle pourra prendre en compte l'inclinaison des barres du rotor.
- ✓ Au stator, les raccourcissements et les spires en parallèles sont prises en compte.
- ✓ Le modèle sera donné pour des températures données des enroulements statoriques et de la cage.
- ✓ Le flux magnétique est supposé proportionnel au courant et les inductances propres et mutuelles sont considérées constantes
- ✓ Les encoches rotoriques sont supposées ouvertes

Résistance statorique – L'équation (B.30) définit la résistance d'une phase statorique.

$$R_s = \rho_c \frac{N_s \cdot l_s}{S_c \cdot n_b} \quad (\text{B.30})$$

ρ_c est la résistivité du cuivre ($\Omega \cdot \text{m}$), N_s est le nombre de spires en série par phase, l_s est la longueur d'une spire, S_c est la section du conducteur, n_b est le nombre de bobines en parallèle.

Réactance de fuites statorique – Soit k_{xs} le coefficient qui, multiplié par les coefficients de perméance, va permettre de calculer les réactances au stator.

$$kxs = \frac{\mu_0 \cdot q_s \cdot \omega_s \cdot N_s \cdot 4 \cdot L_a}{Z_{es}} \quad (\text{B.31})$$

Z_{es} est le nombre d'encoches statoriques, L_a est la longueur du paquet de tôles, ω_s est la pulsation statorique, q_s est le nombre de phases statorique, μ_0 est la perméabilité du vide ($4\pi 10^{-7}$ H/m).

Réactance de fuites d'encoche statorique pour le calcul de réactance de fuites d'encoche, on suppose que le flux traverse l'encoche en ligne droite. Si on considère la géométrie de l'encoche qui est donnée par la Figure B. 5, on peut calculer le coefficient de perméance λ_{es} comme suit :

$$\lambda_{es} = \frac{2 \cdot h_1}{3(b_1 + b_3)} + \frac{h_2}{b_3} + \frac{2 \cdot h_3}{b_2 + b_3} + \frac{h_4}{b_2} \quad (\text{B.32})$$

On obtient la réactance d'encoche statorique :

$$X_{es} = \lambda_{es} \cdot kxs \quad (\text{B.33})$$

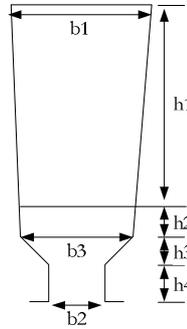


Figure B. 5. Géométrie d'encoche statorique

Réactance de fuites différentielle le coefficient de perméance λ_{ds} correspondant aux flux différentiel de phase est donné par :

$$\lambda_{ds} = \frac{\tau_p^2}{\pi^2 \cdot h_e \cdot \tau_{ds}} \cdot Kd \quad (\text{B.34})$$

Kd est le coefficient de dispersion différentielle (courbe p 137 [163]), h_e est la hauteur d'entrefer. On obtient la réactance différentielle statorique :

$$X_{ds} = \lambda_{ds} \cdot kxs \quad (\text{B.35})$$

Réactance de fuites de tête de bobine la perméance correspondante λ_{tb} est estimée par une méthode approximative d'après [163].

$$\lambda_{tb} = \frac{0,57 \cdot l_{tb} - 0,365 \cdot \tau_p}{l_{tb}} \quad (\text{B.36})$$

l_{tb} est la longueur d'une tête de bobine. On obtient la réactance de fuites de têtes de bobines :

$$X_{tb} = m \cdot \lambda_{tb} \cdot \frac{l_{tb}}{L_a} \cdot kxs \quad (\text{B.37})$$

m est le nombre d'encoches statorique par pôle et par phase. Finalement, la réactance totale de fuites statorique est la somme de trois réactances.

$$X_s = X_{es} + X_{ds} + X_{tb} \quad (\text{B.38})$$

Réactance magnétisante – Cette réactance X_μ est due au flux principal de la machine. Le principe de calcul est basé sur la détermination de l'énergie stockée dans l'entrefer en ne tenant compte que du fondamental du champ.

$$X_\mu = \mu_0 \cdot \frac{2 \cdot q_s \cdot f_s \cdot k_b^2 \cdot N_s^2 \cdot L_a \cdot d_{is}}{p^2 \cdot h_e \cdot k_c} \quad (\text{B.39})$$

Résistance caractérisant le fer – cette résistance R_μ est estimée à partir des pertes fer déterminée dans le chapitre 2, paragraphe 2.3.4 page 50.

$$R_\mu = \frac{(k_u \cdot U)^2}{P_{fer}} \quad (\text{B.40})$$

k_u est le coefficient qui tient compte de la chute de la tension aux bornes de la résistance statorique.

Résistance rotorique ramené au stator – La résistance de barres rotoriques R_b est calculée comme suit :

$$R_b = \rho_{al} \cdot \frac{L_a}{S_{br}} \quad (\text{B.41})$$

La résistance de l'anneau de court circuit entre deux barres R_{an} est aussi considérée. Cette résistance est ramenée à une résistance série avec la barre.

$$R_{an} = \rho_{al} \cdot \pi \cdot \frac{d_{an}}{Z_{er} \cdot S_{an}} \cdot \frac{1}{\left(2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Z_{er}}\right)\right)} \quad (\text{B.42})$$

Z_{er} est le nombre de barres rotoriques, S_{an} est la section de l'anneau de court-circuit, d_{an} est le diamètre moyen de la cage.

En tenant compte de l'effet de peau qui ne s'applique qu'à la résistance de la barre, la résistance rotorique ramenée au stator R'_r vaut :

$$R'_r = K \cdot (k_{ep} \cdot R_b + 2 \cdot R_{an}) \quad (\text{B.43})$$

K est le coefficient pour ramener au stator les impédances, k_{ep} est le coefficient tenant compte de l'effet de peau pour les résistances.

Réactance de fuites rotorique – Comme dans le cas de calcul de réactance de fuites statorique, on commence par le calcul du coefficient qui, multiplié par les coefficients de perméance, va permettre de calculer les réactances au rotor.

$$k_{xr} = \mu_0 \cdot \omega_s \cdot L_a \quad (\text{B.44})$$

Réactance de fuites d'encoche rotorique pour l'encoche rotorique donnée par la Figure B. 6, on peut alors calculer le coefficient de perméance, en tenant compte de l'effet de peau qui ne s'applique qu'à la perméance due au flux de fuites de l'encoche.

$$\lambda_{er} = \left(\frac{2.h_1}{3.(b_1 + b_3)} + 0,623 + \frac{h_4}{3.b_2} \right) .k_x \quad (B.45)$$

k_x est le coefficient tenant compte de l'effet de peau pour les réactances. La réactance d'encoche rotorique ramenée au stator est alors :

$$X'_{er} = K.(\lambda_{er}.k_x r) \quad (B.46)$$

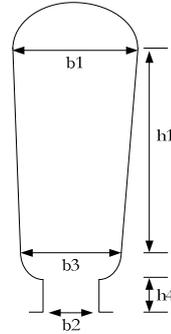


Figure B. 6. Géométrie de l'encoche rotorique

Réactance différentielle rotorique Le coefficient de perméance correspondant au flux différentiel de phase λ_{dr} est:

$$\lambda_{dr} = \frac{\tau_p^2}{\pi^2 . h_e . \tau_{dr}} . Kd \quad (B.47)$$

Kd est le coefficient de dispersion différentielle, h_e est la hauteur d'entrefer, τ_{dr} est le pas dentaire rotorique. On obtient la réactance différentielle rotorique ramenée au stator X'_{dr} :

$$X'_{dr} = K.(\lambda_{dr}.k_x r) \quad (B.48)$$

Réactance de fuites de l'anneau de court-circuit cette réactance est estimée à l'aide de la formule issue de [163].

$$\lambda_{acc} = \frac{Z_{er} . \tau_p}{2 . p . q_s . L_a} . G \quad (B.49)$$

G est le coefficient obtenu à partir de la courbe p 445 [163]. On obtient alors la réactance de fuites de l'anneau de court-circuit ramenée au stator :

$$X'_{acc} = K.(\lambda_{acc}.k_x r) \quad (B.50)$$

Réactance de fuites due à l'inclinaison des barres cette réaction X'_i prend en compte l'inclinaison de barres rotoriques.

$$X'_i = \left(\frac{1}{k_i^2} - 1 \right) . X_m \quad (B.51)$$

k_i est le coefficient d'inclinaison des barres rotoriques. Finalement, la réactance totale de fuites rotorique ramenée au stator est :

$$X'_r = X'_{er} + X'_{dr} + X'_{acc} + X'_i \quad (\text{B.52})$$

5. Simulation de la machine par Flux2D

Description du moteur modélisé, les données géométriques et électriques – Les simulations numériques présentées dans ce manuscrit se réfèrent à un moteur à induction à 2 paires de pôles, triphasé connecté en étoile. La coupe transversale des armatures statoriques et rotoriques est illustrée à la Figure B. 7. Le moteur est caractérisé par une puissance nominale $P_n=10$ kW, une tension nominale $U_n=230/400$ V et une fréquence de source d'alimentation $f=50$ Hz.

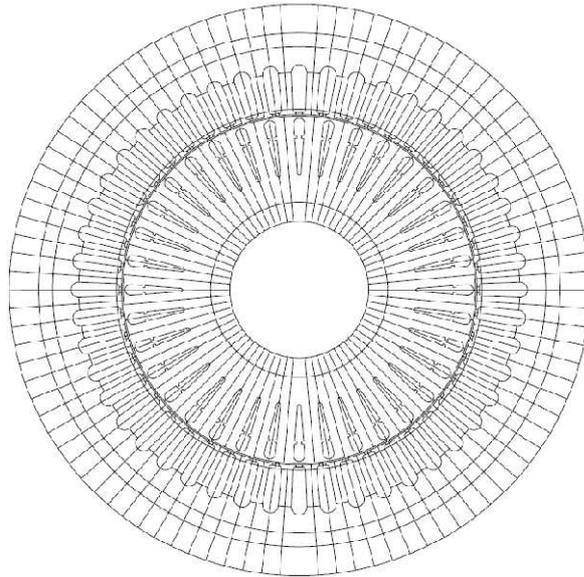


Figure B. 7. Coupe transversale des armatures statoriques et rotoriques

L'armature statorique contient 48 encoches et l'armature rotorique contient 36 barres. Le diamètre extérieur du circuit magnétique statorique vaut 200 mm, le diamètre intérieur ou diamètre d'alésage vaut 122.55 mm, le diamètre extérieur du rotor vaut 122.15 mm, l'épaisseur d'entrefer est égale à 0.2 mm, le diamètre intérieur du rotor vaut 47.8 mm et, enfin, la longueur du circuit magnétique vaut 179 mm.

Les enroulements statoriques, sont formés de 12 bobines à deux sections étagées. Chaque encoche contient 23 conducteurs. Le coefficient de foisonnement de bobinage vaut 0.501. La résistance statorique par phase vaut 0.41Ω . L'enroulement du rotor est une cage d'écureuil double en fonte d'aluminium. La résistivité de l'aluminium vaut $48.10^{-9} \Omega\text{m}$. Les simulations magnéto-harmoniques considèrent les valeurs de résistances correspondant à la température nominale du moteur, 155°C .

Circuit électrique de couplage associé pour la simulation en alimentation de tension – Les composants du circuit "en dehors" du moteur, pour les applications avec une source de tension imposée, sont présentés à la Figure B. 8 ;

- ✓ trois sources de tension simple caractérisées par une valeur efficace 230 V,
- ✓ trois phases initiales, $\varphi=0, -120, 120$ et une fréquence, $F_n=50$ Hz ;
- ✓ trois résistances équivalentes pour modéliser la chute de tension de la source d'alimentation égale à $0,41 \Omega$;
- ✓ trois inductances qui caractérisent les fuites de têtes de bobines qui sont calculés analytiquement, $l_{tb} = 1,4$ mH;
- ✓ les résistances 3D sont déjà prises en compte dans les valeurs de résistances des bobines;

- ✓ une composante caractérise la cage d'écuriel et définie par le nombre de barres rotoriques, $Z_{er}=36$, la résistance d'une portion d'anneau aussi calculée analytiquement, $R_{an}=1.69 \mu\Omega$, ainsi qu'une inductance d'une portion d'anneau calculée analytiquement, $l_{an}=6.75e-9H$;

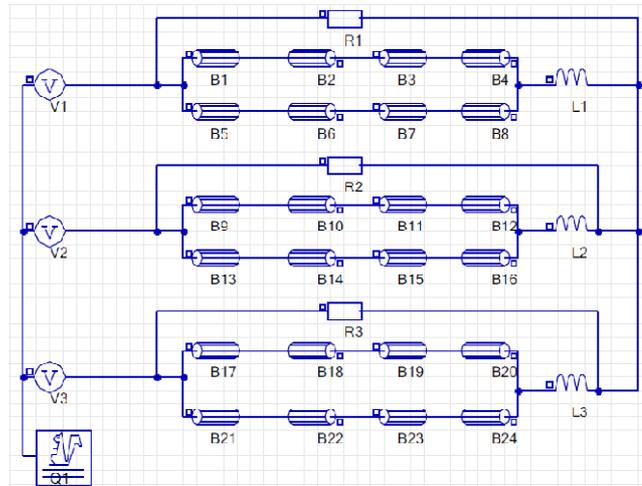


Figure B. 8. Circuit de couplage en tension

Propriétés physique et conditions initiales et aux limites – Les caractéristiques $B(H)$ du circuit magnétique statorique et rotorique du moteur de référence sont données par la courbe illustrée à la Figure B. 9 (donnée par le constructeur de tôles Thyssen Krupp – Tôles NO).

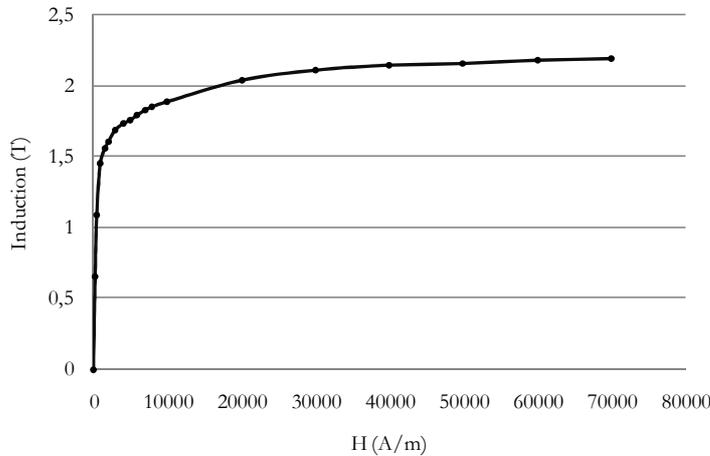


Figure B. 9. Caractéristique $B(H)$ de tôles NO utilisés dans le circuit magnétique du stator et rotor

Le calcul des pertes magnétiques par Flux2D dans la phase post-traitement, par le modèle de séparation de pertes (Bertotti [164]), est basé sur la carte de densité de flux qui utilise les caractéristiques de tôles – Coefficient de pertes hystérésis, $C_{hyst}=380 \text{ Ws}/T^2m^3$ – Coefficient de pertes classiques, $\sigma=4800000 \Omega^{-1}m^{-1}$ – Coefficient de pertes par excès, $C_{exc}=1.8 \text{ Ws}^{1.5}/m^3/T^{1.5}$ – Coefficient de foisonnement, $k_{fm}=0.98$ – Epaisseur de tôles, $e_m=0.65 \text{ mm}$.

Les limites du domaine de calcul sont la limite extérieure de fer du stator magnétique, et la limite intérieure de fer du rotor. Tous les calculs utilisent la condition de Dirichlet de flux magnétique nul à ces frontières. En exprimant en termes de potentiel vecteur magnétique, cette condition signifie une valeur nulle pour le potentiel vecteur magnétique le long des deux frontières.

Le logiciel Flux2D utilisé pour effectuer cette simulation fonctionne en mode magnéto-harmonique non linéaire. Cette application permet l'étude des dispositifs en régime harmonique (régime permanent sinusoïdal) à une fréquence donnée. Les grandeurs physiques calculées varient de façon sinusoïdale dans le temps (à une fréquence donnée). Elles s'expriment à l'aide de la notation complexe. Lors de cette application, le rotor est considéré en train de glisser par rapport au stator dans la zone de glissement (entrefer). Une condition initiale particulière dans les applications magnéto-harmoniques se réfère à la position relative entre les armatures statorique et rotorique par rapport à la position dans la construction géométrique présentée à la Figure B. 7. Une position initiale moyenne est déterminée de telle sorte que la valeur de couple électromagnétique soit sensiblement égal à la valeur moyenne de la variation cyclique du couple lors du changement de position du rotor par rapport au stator. Cette position initiale moyenne vaut 3.57° . On l'a retenue pour calculer les caractéristiques nominales de moteur.

Annexe C

1. Photos des différentes expérimentations

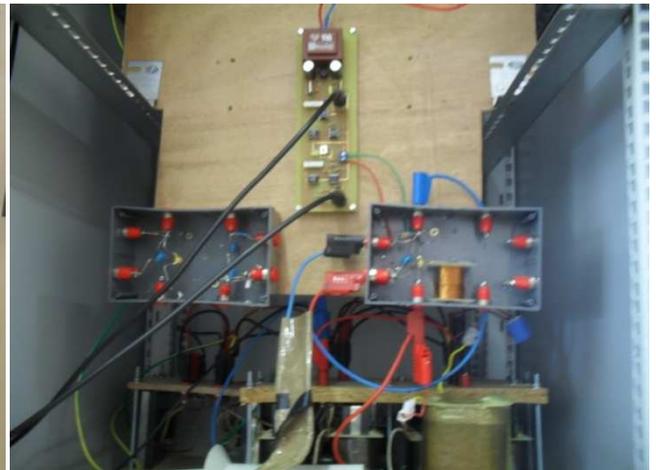
i. Manipulation pour la mesure de la force de collage



Préparation des éprouvettes normalisées et essai de test de collage

Bobines en vrac de forme ovale ($\varnothing = 57\text{ mm}$)

ii. Manipulation expérimentale pour la mesure du PDIV



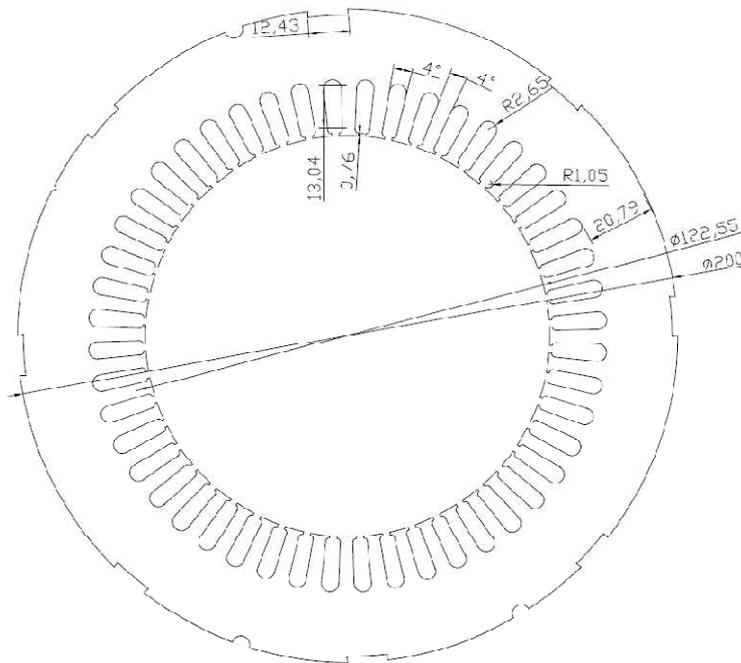
Source de tension à fréquence élevée et circuit de mesure de seuil de décharges partielles

iii. Test de moteurs utilisant la méthode différentielle



Essai comparatif entre le moteur de référence (foncé) et le moteur prototype (clair)

iv. Plan de fabrication de couronnes statoriques du prototype



Production scientifique

Les travaux de recherche de cette thèse ont fait l'objet de publications scientifiques :

Journal international :

- **Boughanmi, W.**; Manata, J.P.; Roger, D.; Jacq, T.; Streiff, F. "Life cycle assessment of a three-phase electrical machine in continuous operation". *Electric Power Applications, IET*, Volume 6, Issue 5, 2012, pages 277 – 285.

Conférences internationales :

- **Boughanmi, W.**; Manata, J. P.; Roger, D. "Contribution of LCA approach to the choice of rotating electrical machines for environmental impact minimization". *XXth International Conference on Electrical Machines (ICEM 2012)*. Marseille-France, pages 1 – 7.
- **Boughanmi, W.**; Manata, J. P.; Roger, D.; Jacq, T.; Streiff, F. "Intermittent duty of induction machine: Investigations of energy efficiency for environmental impact minimization", *Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012)*, 6th IET International Conference on. Bristol-UK.
- **Boughanmi, W.**; Manata, J. P.; Roger, D.; Belgrand, T. "Analyse du cycle de vie comparative des structures de circuits magnétiques des machines à courant alternatif". *Conférence Francophone sur l'Eco-conception en Génie électrique (CONFREGÉ 2012)*, 2^{ème} édition à Montréal-Canada.
- Kratz, M.; Streiff, F.; **Boughanmi, W.**; Manata, J. P.; Roger, D. "Démarche d'éco-conception appliquée à la motorisation électrique". *Conférence Francophone sur l'Eco-conception en Génie électrique (CONFREGÉ 2012)*, 2^{ème} édition à Montréal-Canada.
- **Boughanmi, W.**; Manata, J. P.; Roger, D.; Jacq, T.; Streiff, F. "Comparative environmental assessment of the electrical machines winding using the Life cycle assessment". *International Congress on Life Cycle Assessment (LCA 2011)*, Lille-France, pages 92 – 95.
- **Boughanmi, W.**; Manata, J. P.; Roger, D.; Brudny, J.F.; Frezel, Ph. "Analyse comparative de l'imprégnation d'un bobinage et de diverses solutions de Thermo collage". *Conférence Francophone sur l'Eco-conception en Génie électrique (CONFREGÉ 2010)*, 1^{ère} édition à Toulouse-France.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Leonardo Energy, the global community for sustainable energy professionals. <http://www.leonardoenergy.org>, accessed October 2009
- [2] M. Kratz, F. Streiff, W. Boughanmi, J.P. Manata, and D. Roger: 'Démarche d'éco-conception appliquée à la motorisation électrique'. Confrege, Montréal, Canada, 2012, pp. 1-11
- [3] S. Fassbinder: 'Saving energy with high-efficiency motors'. 2007
- [4] R. P. Bouchard and G. Olivier: 'Conception de moteurs asynchrones triphasés'. Editions de l'école polytechnique de Montréal, 1997, pp. 1-6
- [5] M. Thieman, R. Kamm, and J. Jorstad: 'Copper motor rotors: Energy saving efficiency, now also economic feasibility'. Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 22-24 October 2007, pp. 328-333
- [6] A. Ancel: 'influence de la coulée sous pression d'une cage d'écureuil en cuivre sur le comportement magnétique d'une machine asynchrone triphasée', Thèse, Génie électrique, Université d'Artois, Béthune, 2001
- [7] C. Jouanno: 'L'efficacité énergétique dans l'Union Européenne: panorama des politiques et des bonnes pratiques'. Service Observation, Economie et Evaluation de l'ADEME, novembre 2008, pp. 1-52
- [8] V. Debusschere: 'Contributions méthodologiques à l'éco-conception des convertisseurs électromagnétiques d'énergie', Thèse, Génie électrique, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Bretagne, 2009
- [9] 'The Rio Declaration On Environment And Development. The United Nations Conference on Environment and Development', Rio de Janeiro 1992
- [10] Gro Harlem Brundtland: 'Madam Prime Minister: A Life in Power and Politics'. New York, 2002
- [11] P. Roqueplo: 'Pluies acides, menaces pour l'Europe', 1988
- [12] G. Megie: 'Ozone, l'équilibre rompu. Presses du CNRS', 1989
- [13] 'Key World Energy Statistics. Agence Internationale de l'Energie', 2010
- [14] P. Mohr: 'Analyse économique globale. Indices des prix des produits de base'. rapport technique du Groupe Banque Scotia, 2009
- [15] ISO 14062: 'Management environnemental - Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit', 2006
- [16] ISO 14044: 'Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines', 2002
- [17] T. E. Graedel: 'Streamlined Life-Cycle Assessment', Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 1998
- [18] C. Bakker: 'Environment information for industrial designers', Thèse, Université de Technologie de Delft, Pays - Bas, 1995
- [19] M. Janin: 'Démarche d'éco-conception en entreprise - Un enjeu: construire la cohérence entre outils et processus', Thèse, École nationale supérieure d'arts et métiers, Chambéry, 2000
- [20] H. Brezet: 'Dynamics in ecodesign practice', UNEP Industry and Environment (UNEP IE), 1997, 20, (1-2), pp. 21-24
- [21] A. Stevels: 'Integration of EcoDesign into business, a new challenge', in EcoDesign '99: First International Symposium On Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo, Japan 1999, pp. 27-32
- [22] C. Abrassart and F. Aggeri: 'Quelles capacités dynamiques pour les stratégies de développement durable des entreprises ? Le cas du management de l'éco-conception'. XVIème Conférence Internationale de Management Stratégique, Montréal, Canada, 2007, pp. 29
- [23] H. Brezet and C. V. Hemel: 'Ecodesign: a promising approach to sustainable production and consumption'. Rathenau Institute. TU Delft & UNEP, Paris, 1997, pp. 1-8
- [24] M. Fugère: 'Intégration des critères de conception et de l'analyse de cycle de vie simplifiée pour l'éco-conception de produits à usage unique', Thèse, Génie chimique, Université de Montréal, 2009

- [25] J. Lagerstedt, C. Luttrupp, and L.-G. Lindfors: 'Functional Priorities in LCA and Design for Environment', *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2003, 8, (3), pp. 160-166
- [26] 'Le développement de produits éco-conçus: un intérêt économique et environnemental certain'. *Stratégie & études (ADEME)*, 23 - 27 janvier 2010
- [27] 'Étude franco-québécoise « L'éco-conception: quels retours économiques pour l'entreprise ? »'. Une collaboration entre : IDP à Montréal (Natalie Blouin, Guy Belletête), Pôle éco-conception de la Chambre de commerce industrie et des services de Saint-Etienne /Montbrison (Samuel Mayer), CETIM(Pierre-Marie Gaillot), DRIRE(Alix Madet), ADEME Rhône-Alpes(Hervé Baffie), MDEIE(Nicole Dionne et le CIRANO), Décembre 2008
- [28] J. Lagerstedt: 'Functional and environmental factors in early phases of product development - Eco functional matrix', Thèse, KTH Royal Institute of technology, Stockholm, 2003
- [29] S. Le Pochat: 'Intégration de l'éco-conception dans les PME : Proposition d'une méthode d'appropriation de savoir-faire pour la conception environnementale des produits', Thèse, L'école nationale supérieure d'arts et métiers, Paris, 2005
- [30] C. Walker: 'Assessing well-being for the promotion of student flourishing. The Gallup Organization Global Well-Being Forum', Washington DC, USA, October 2007
- [31] S. L. Pochat, G. Bertoluci, and D. Froelich: 'Integrating eco-design by conducting changes in SMEs', *Journal of Cleaner Production*, 2007, 15, (7), pp. 671-680
- [32] B. Laratte: 'Eco-conception & ACV pour l'innovation et le développement durable : Analyse de cycle de vie Principes, applications et limites'. EVEA Évaluation et Accompagnement SARL,
- [33] ISO 14040: 'Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework', 2006
- [34] E. Gasafi, L. Meyer, and L. Schebek: 'Using Life-Cycle Assessment in Process Design: Supercritical Water Gasification of Organic Feedstocks', *Journal of Industrial Ecology*, 2003, 7, (3-4), pp. 75-91
- [35] R. Heijungs: 'Identification of key issues for further investigation in improving the reliability of life-cycle assessments', *Journal of Cleaner Production*, 1996, 4, (3-4), pp. 159-166
- [36] P. Rousseaux. (2005, 10 octobre) Life Cycle Analysis, LCA. Technical engineering, reference G 5500.
- [37] O. Jolliet, M. Saade, and P. Crettaz, "ACV, comprendre et réaliser un écobilan," in *Presses Polytechniques Universitaires Romandes*, ed. Eyrolles, 2005.
- [38] E. Benetto. (2005, 10 octobre) Analyse du cycle de vie - Réalisation de l'inventaire. *Techniques de l'Ingénieur*, référence G 5510.
- [39] J. Haake. (2000, 10 juillet) Dématérialisation - Mesure par bilans matières et MIPS. *Techniques de l'Ingénieur*, référence G 5910.
- [40] P. Rousseaux. (1998, 10 janvier) Analyse du cycle de vie : évaluation des impacts. *Techniques de l'Ingénieur*, référence G 5605.
- [41] K. Khalifa. (1999, 10 janvier) Analyse du cycle de vie : problématique de l'évaluation des impacts. *Techniques de l'Ingénieur*, référence G 5610.
- [42] Analyse du cycle de vie. http://www.quantis-intl.com/fr/analyse_du_cycle_de_vie, accessed october 2011
- [43] Initiation d'une classe de bts électrotechnique à l'écoconception. http://www.stielec.ac-aixmarseille.fr/cours/pawlak/eco_conception/eco-conception.htm, accessed 18 Août 2010
- [44] A.S.G. Andræ, D.R. Andersson, and J. Liu: 'Significance of intermediate production processes in life cycle assessment of electronic products assessed using a generic compact model', *Journal of Cleaner Production*, 2005, 13, pp. 1269-1279
- [45] C.J. Rydth: 'Environmental Assessment of Battery Systems in Life Cycle Management'. Chalmers University of Technology, 2001
- [46] C.J. Rydh and M. Karlstrom: 'Life cycle inventory of recycling portable nickel-cadmium batteries', *Ressources, Conservation and Recycling*, 2002, 34, pp. 289-309
- [47] T. Hartikainen, A. Korpela, J. Lehtonen, and R. Mikkonen: 'A Comparative Life-Cycle Assessment Between NbTi and Copper Magnets', *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2004, 14, pp. 1882-1885
- [48] K.J. Martchek: 'Modelling More Sustainable Aluminium', *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2006, 11, pp. 34-37
- [49] R.B.H Tan and H.H. khoo: 'An LCA study of a primary aluminum supply chain', *Journal of Cleaner Production*, 2005, 13, pp. 607-618

- [50] R.V. Berkel: 'Eco-efficiency in the Australian minerals processing sector', *Journal of Cleaner Production*, 2007, 15, pp. 772-781
- [51] C.J. Rydh and B.A. Sanden: 'Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part II : Energy return factors and overall battery efficiencies', *Energy Conversion and Management*, 2005, 46, pp. 1980-2000
- [52] P. Denholm and G.L. Kulcinski: 'Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems', *Energy Conversion and Management*, 2004, 45, pp. 2153-2172
- [53] A. Rafaschieri, M. Rapaccini, and G. Manfrida: 'Life Cycle Assessment of electricity production from poplar energy crops compared with conventional fossil fuels', *Energy Conversion and Management*, 1999, 40, pp. 1477-1493
- [54] R. Kannan, C.P. Tso, R. Osman, and H.K. Ho: 'LCA-LCCA of oil fired steam turbine power plant in Singapore', *Energy Conversion and Management*, 2004, 45, pp. 3093-3107
- [55] E. Benetto, E.C. Popovici, P. Rousseaux, and J. Blondin: 'Life cycle assessment of fossil CO2 emissions reduction scenarios in coal-biomass based electricity production', *Energy Conversion and Management*, 2004, 45, pp. 3053-3074
- [56] U. Takayoshi, T. Shiino, and H. Onishi: 'Evaluation of electronic components in life cycle assessment', *Journal of Mater Cycles Waste Management*, 1999, 1, pp. 25-32
- [57] J. Tingstrom, L. Swanstrom, and R. Karlsson: 'Sustainability management in product development projects the ABB experience', *Journal of Cleaner Production*, 2006, 14, pp. 1377-1385
- [58] 'Power Transformers 40/50 MVA (ONAN/ONAF)'. ABB Environmental Product Declaration, 2003
- [59] E. Laruelle, O. Chuniaud, and A. Ficheux: 'Déploiement de la démarche d'écoconception dans un département R&D d'AREVA T&D.', *Revue de l'Electricité et de l'Electronique*, 2009, 5, pp. 25-31
- [60] W. Wang, T. Mehiri, R. Critchley, F. Gallon, and G. Tremouille: 'Problematic and possible solutions to improve energy efficiency and decrease CO2-equivalent emissions in the transmission of electricity', *Revue de l'Electricité et de l'Electronique*, 2009, 5, pp. 46-51
- [61] C. Côté: 'Évaluation comparative de deux méthodes d'analyse de cycle de vie simplifiée dans un contexte de conception de produit au sein de PME', Thèse, Aménagement option design et complexité, Université de Montréal, 2005
- [62] B. Multon, H. Ben ahmed, V. Debusschere, Y. Thiaux, J. Aubry, C. Jaouen, and F. Barruel: 'Expériences de recherche en éco-conception dans le domaine du Génie Electrique', in *Confrege*, Toulouse France, 6-7 décembre 2010
- [63] V. Debusschere, H. Ben Ahmed, and B. Multon: 'Eco-design of Electromagnetic Energy Converters: The case of the electrical transformer', in *Electric Machines & Drives Conference, IEMDC IEEE International*, May 2007, pp. 1599-1604
- [64] V. Debusschere, B. Multon, H. Ben Ahmed, P. E. Cavarec, and P. Geriniere: 'Minimization of life cycle energy cost of a single-phase induction motor', in *Electric Machines and Drives Conference. IEMDC '09 IEEE International 3-6 May 2009*, pp. 1441-1448
- [65] V. Debusschere, B. Multon, H. Ben Ahmed, and P. E. Cavarec: 'Life cycle design of a single-phase induction motor', *IET Electric Power Applications*, 2010, 4, (5), pp. 348-356
- [66] V. Debusschere, B. Multon, and H. Ben Ahmed: 'L'éco-conception dans le Génie Électrique : application au cas de la machine asynchrone triphasée à cage d'écuréuil', *REE*, 2009, (5),
- [67] J. Maruszczyk, M. Lhenry, M. Helinko, and Z. Korendo: 'L'efficacité énergétique devient la règle. Les moteurs électriques voient leurs classes de rendement énergétique harmonisées au niveau international', *Revue ABB 3*, 2009,
- [68] A. T. Almeida, F. Ferreira, J. Fong, and C. Brunner: 'Electric motor standards, ecodesign and global market transformation', in *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, ICPS IEEE*, May 2008, pp. 1-9
- [69] A.T. Almeida, F. Ferreira, J. Fong, and P. Fonseca: 'Improving the penetration of energy-efficient motors & drives'. European Commission DG TREN, SAVE II Motors Final Report, March 2008
- [70] E. Martinez, P. Andrada, B. Blanque, M. Torrent, J. I. Perat, and J. A. Sanchez: 'Environmental and life cycle cost analysis of a switched reluctance motor', in *Electrical Machines, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on*, 6-9 Sept. 2008 2008, pp. 1-4

- [71] H. D Keulenaer: 'Induction motor replacing die-cast aluminium with copper rotor to increase efficiency', Leonardo Energy, 2006, p. 6
- [72] D. Binesti and J. P. Ducreux: 'Core losses and efficiency of electrical motors using new magnetic materials', Magnetics, IEEE Transactions on, 1996, 32, (5), pp. 4887-4889
- [73] S. Lopez, B. Cassoret, J. F. Brudny, L. Lefebvre, and J. N. Vincent: 'Grain Oriented Steel Assembly Characterization for the Development of High Efficiency AC Rotating Electrical Machines', Magnetics, IEEE Transactions on, 2009, 45, (10), pp. 4161-4164
- [74] S. Lopez, B. Cassoret, J. F. Brudny, L. Lefebvre, and J. N. Vincent: 'Validation of high efficiency AC rotating electrical machine magnetic circuit by particular tests at standstill'. Soft Magnetic Materials Conference, Torino, Italy, 2009, pp. 1-4
- [75] SKF Energy Efficient deep groove ball bearings. www.skf.com, accessed january 2010
- [76] F. Notelet and J. F. Brudny: 'Calcul des machines électriques', La revue 3EI, SEE - cercle thématique 13.01, 1994,
- [77] J. Ancel. Machines asynchrones, Fonctionnement et calculs. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique, D 3-450.
- [78] Y betin. Refroidissement des machines électriques tournantes. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique, D 3-460.
- [79] J.L. Coudert, P. Delsalle, C. Dupui, and D Hottois. Construction mécanique des machines électriques tournantes. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique, D 3-780.
- [80] Energie+, conception et rénovation des bâtiments tertiaires http://www.energieplus-lesite.be/energieplus/page_1.htm, accessed January 2012
- [81] G. Gie, L. haeusler, and M.A. Kibongui: ' Record of recycling (1998-2007) from French Environment and Energy Management Agency'. Angers,2009
- [82] Ecoinvent. <http://www.pre.nl/ecoinvent>, accessed April 2010
- [83] C. Keyes: 'Guide de référence sur l'efficacité énergétique de moteurs'. CEA Technologies Inc. Canada, 2007
- [84] W. T. Thomson and M. Fenger: 'Case Histories of Current Signature Analysis to Detect Faults in Induction Motor Drives.'. IEMDC, 2003, pp. 1459-1465
- [85] W. T. Thomson and M. Fenger: 'Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults'. IEEE Industry Applications Society Meeting (Annual Conference IAS'01), Chicago, USA, Juillet/Août 2001, pp. 26-34
- [86] A. H. Bonnet and G. C. Soukup: 'Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phases Squirrel-Cage Induction Motors.', IEEE Transactions on Industry Applications, 1992, 28, (4), pp. 921-937
- [87] M. Cacciari and G.C. Montanari: 'Probabilistic models for life prediction of insulating materials.', Journal of Physics, 1990, 23, pp. 1592-1598
- [88] G.C. Montanari and L. Simoni: 'Aging phenomenology and modeling', IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993, 28, (5), pp. 755-776
- [89] Leroy Somer Technical Catalogue, "3-phase TEFV cage induction motors 0,09 to 160 kW," ed, 1998.
- [90] IEC 60034-1: 'Rotating electrical machines. Part 1- Rating and performance', 2004
- [91] M. Dessoude. (1996, 10 juin) Moteurs asynchrones : Choix et problèmes connexes (Induction Motors: Selection and Related Problems, in French). Techniques de l'Ingénieur, reference D 3 490.
- [92] Motor Management: 'Application basics of operation of three-phase induction motors (design - duty - types Selection - dimensioning)'. Rockwell Automation Sprecher und Schuh AG (Aarau), Sprecher und Schuh Holding (Aarau), 1996
- [93] M. Liwscitz: 'Calcul des machines électriques (calculation of electrical machines, in French)', vol. 2, 1967
- [94] L. P. Alger: 'Induction machines, their behavior and uses', 1970
- [95] D. De Benedittis: 'Étude et modèle électromagnétique de machine asynchrone pour alternateur-démarrreur', Thèse, Génie électrique, institut polytechnique de Grenoble, 2002
- [96] W. Degaïchia: 'Conception et dimensionnement de moteurs asynchrones de petit et moyenne puissance', Thèse, Génie électrique, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2001
- [97] A. Fasquelle: 'Contribution à la modélisation multi-physique : électro-vibro-acoustique et aérothermique de machines de traction', Thèse, Génie électrique, Ecole centrale, Lille, 2007

- [98] E. Semail: 'Outils et méthodologie d'étude des systèmes électriques polyphasés. Généralisation de la méthode des vecteurs d'espace', Thèse, Génie électrique, Université Lille 1 - Sciences et technologies, 2000
- [99] M. Liwscitz: 'Calcul des machines électriques'. SPES Lausanne-Dunod, Paris, 1967
- [100] A. Taieb Brahimi: 'Contribution à la modélisation de la machine asynchrone à cage par logiciels d'éléments finis 2D et 3D', Thèse, Génie électrique, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1992
- [101] F. Wurtz: 'Une nouvelle approche pour la conception sous contraintes de machines électriques', Thèse, Génie électrique, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1996
- [102] O. Sahraoui: 'Calcul des schémas équivalents de la machine asynchrone par la méthode des éléments finis', Thèse, Génie électrique, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1994
- [103] P. Zhou, J. Gilmore, Z. Badics, and Z. J. Cendes: 'Finite element analysis of induction motors based on computing detailed equivalent circuit parameters', *Magnetics, IEEE Transactions on*, 1998, 34, (5), pp. 3499-3502
- [104] Bertotti: 'Physical interpretation of eddy current losses in ferromagnetic materials. I. Theoretical considerations', *Journal of Applied Physics*, 1985, 57, (6), pp. 2110-2117
- [105] R. E. Hellmund and P. H. McAuley: 'A Study of Short-Time Ratings and Their Application to Intermittent Duty Cycles', *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1940, 59, (12), pp. 1050-1055
- [106] R.E. Hellmund: 'Analysis of rating methods for intermittent loads', 1942,
- [107] A. M. Wahl and L. A. Kilgore: 'Transient Starting Torques in Induction Motors', *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the*, 1940, 59, (11), pp. 603-607
- [108] E. S. Gilfillan and E. L. Kaplan: 'Transient Torques in Squirrel-Cage Induction Motors, With Special Reference to Plugging', *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the*, 1941, 60, (12), pp. 1200-1209
- [109] Jeong Jong-Ho, Lee Eun-Woong, and Cho Hyun-Kil: 'Analysis of transient state of the squirrel cage induction motor by using magnetic equivalent circuit method', in *Electrical Machines and Systems, 2003. ICEMS 2003. Sixth International Conference on*, 9-11 Nov. 2003 2003, pp. 720-723 vol.2
- [110] R Abdelati and M.F. Mimouni: 'Minimum-energy consumption of a double stator induction motor operating in dynamic regime', *Journal of Electrical Engineering*, 12, (3), p. 11
- [111] S. N. Vukosavic and E. Levi: 'A method for transient torque response improvement in optimum efficiency induction motor drives', *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 2003, 18, (4), pp. 484-493
- [112] I. Braslavsky, Z. Ishmatov, Y. Plotnikov, and I. Averbakh: 'Energy consumption and losses calculation approach for different classes of induction motor drives', in *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM International Symposium on*, 23-26 May 2006, pp. 1449-1452
- [113] A. A. Jimoh: 'Thermal effects of stray load losses in induction machines', *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 2000, 36, (4), pp. 1085-1093
- [114] I. Boldea and S.A. Nasar: 'Vector Control of Ac Drives', CRC Press, 1992
- [115] P. Vas: 'Electric Machines and Drives: A Space-Vector Theory Approach', Clarendon Press, 1992
- [116] A. Krings: 'Overview and comparison of iron loss models for electrical machines'. Seventh International Conference & Exhibition on Ecologic vehicles and renewable energies, Monaco, 25-28 March 2010, pp. 1-10
- [117] L. Dreyfus: 'Theorie der zusätzlichen Eisenverluste in Drehstrom asynchronmotoren (Theory of the additional iron losses in three-phase asynchronous motors, in German)'. *Archiv für Elektrotechnik*, 1928, pp. 37-87, 188-298.
- [118] Steinmetz. C: 'On the law of hysteresis (originally published in 1892)', *Proceedings of the IEEE*, 1984, 72, (2), pp. 197-221
- [119] Jordan. H: 'Die ferromagnetischen konstanten für schwache wechselfelder', *Elektr.Nach.Techn.*, 1924, 1, p. 8
- [120] S. Jacobs, D. Hectors, F. Henrotte, M Hafner, M. H. Gracia, K. Hameyer, P. Goes, D. R. Romera, E. Attrazic, and S. Paolinelli: 'Magnetic material optimization for hybrid vehicle PMSM drives', in *EVS24 - International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, Stavanger, Norway 2009
- [121] CML method. <http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>, accessed April 2010
- [122] M. Benhaddadi, G. Olivier, D. Labrosse, and P. Tetrault: 'Premium efficiency motors and energy saving potential', in *Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International*, 3-6 May 2009 2009, pp. 1463-1468
- [123] IEC 60172: 'Méthode d'essai pour la détermination de l'indice de température des fils de bobinage émaillés', 2000
- [124] P. Frezel: 'Une petite révolution dans le fil émaillé'. Green Isolight International, rapport interne 2005

- [125] W. Boughanmi, D. Roger, J.P. Manata, J.F. Brudny, and Ph. Frezel: 'Analyse comparative de l'imprégnation du bobinage et de diverses solutions de thermocollage (Comparative analysis of the winding impregnation and a variety of thermo adherence solutions, in French)'. Confrege Conference, Toulouse, 2010, pp. 1-7
- [126] IEC 60317 - 1: 'Spécifications pour types particuliers de fils de bobinage. Exigences générales-Fils en section circulaire en cuivre émaillé', 2008
- [127] M. Q. Nguyen, D. Malec, D. Mary, P. Werynski, B. Gornicka, L. Therese, and P. Guillot: 'Investigations on dielectric properties of enameled wires with nanofilled varnish for rotating machines fed by inverters', in Electrical Insulation Conference, 2009. EIC 2009. IEEE, May 31 2009-June 3 2009 2009, pp. 377-381
- [128] M.Q. Nguyen, D. Malec, D. Mary, P. Werynski, B. Gornicka, L. Thèrese, and P. Guillot: 'Propriétés des vernis chargés (nano et micro-particules de silice) conçus pour l'imprégnation de moteurs très fortement sollicités (alimentation par onduleur et environnement sévère)'. 5ème colloque sur les Matériaux en Génie Electrique, Montpellier, 2010, pp. 1-6
- [129] IEC 60851- 3: 'Fils de bobinage méthodes d'essai- partie 3: propriétés mécaniques', 1998
- [130] IEC 61033: 'Méthodes d'essai pour la détermination du pouvoir agglomérant des agents d'impregnation sur fil émaillé', 1991
- [131] V. Mihaila: 'Nouvelle Conception des bobinages statoriques des machines à courant alternatif pour réduire les effets négatifs des dV/dt ', Thèse, Génie électrique, Université d'Artois, Béthune, 2011
- [132] C. Hudon, N. Amyot, and J. Jean: 'Long term behavior of corona resistant insulation compared to standard insulation of magnet wire'. IEEE International Symposium on Electrical Insulation., 2-5 april 2000, pp. 13-16
- [133] L. B. Loeb and M.J. Meek: 'The mechanism of spark discharge in air at atmospheric pressure', Journal of Applied Physics, 1940, 11, pp. 438-447
- [134] IEC 60270: 'Technique des essais à haute tension, Mesure des décharges partielles', 2001
- [135] S. Savin, S. Ait-Amar, D. Roger, and G. Vélou: 'Aging effects on the AC motor winding: A correlation between the variation of turn-to-turn capacitance and the PDIV', Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2011, pp. 64-67
- [136] F. Koliatene: 'Contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique', Thèse, Génie électrique, Université Toulouse III - Paul Sabatien, Toulouse, 2009
- [137] EN 60034 -18 -1: 'Machines électriques tournantes : Evaluation fonctionnelle des systèmes d'isolation - Principes directeurs généraux.', 1995
- [138] A. Cavallini, D. Fabiani, and G. C. Montanari: 'Power electronics and electrical insulation systems - Part 3: Diagnostic properties', IEEE Electrical Insulation Magazine, 2010, 26, pp. 30-40
- [139] C. Kwan: 'Dielectric phenomena in solids', Elsevier Academic Press, 2004
- [140] Z. Dun, "super enameled copper wire, magnet wire, enamelled copper wire, thermal class from 130°C to 240°C," in Ningbo Jintian New Material Co, ed. China (Mainland), 1995.
- [141] S. Lopez: 'Définition de nouvelles structures de circuits magnétiques de machines AC utilisant des tôles à grains orientées', Thèse, Génie électrique, Université d'Artois, Béthune France, 2011
- [142] P. Brutsaert and D. Laloy. (2006) Construction des machines tournantes. Elements constitutifs, d3571 edn. Techniques de l'Ingénieur.
- [143] P Beckley: 'Electrical steels for rotating machines', IET, 315 pages, 6 mai, 2002
- [144] P Beckley: 'Electrical steels: a handbook for producers and users'. Newport, European Electrical Steels. ISBN 10-095400390X, 2000
- [145] N. Hihat, S. Lopez, and B. Cassoret: 'Characterization of electrical steel disc stacks for the development of new circular magnetic circuits', Electrical Review Journal, 2010, (0033-2097), pp. 145-148
- [146] S. Chatterjee, D. Bhattacharjee, and N. Gope: 'Variation in structure and magnetic properties during decarb-annealing of electrical steel', Scripta Materialia, 2003, 49, pp. 355-360
- [147] J.C. Bavay and J. Verdun. (1991, 10 décembre) Alliages fer-silicium. Techniques de l'Ingénieur, reference D 2 110.
- [148] M. Nakano, K. Ishiyama, K. I. Arai, and H. Fukunaga: 'Grain growth and magnetic properties of thin grain-oriented 3% silicon steel sheets', in Magnetics Conference, 1999. Digest of INTERMAG 99. 1999 IEEE International, 18-21 May 1999 1999, pp. BD11-BD11
- [149] U.S. Congress: 'Biopolymers: Making Materials Nature's Way'. Office of Technological Assesment, 1993, pp. 51-62

-
- [150] A. L. Phillips: 'Bioplastics Boom', *American Scientist*, 2008, 96, (2), p. 109
- [151] B Momani: 'Assessment of the Impacts of Bioplastics: Energy Usage, Fossil Fuel Usage, Pollution, Health Effects, Effects on the Food Supply, and Economic Effects Compared to Petroleum Based Plastics'. 2009
- [152] N. Jarroux. (2008) les biopolymères: différentes familles, propriétés et applications. *Techniques de l'Ingénieur*, référence AM3580.
- [153] V. Lebugle: 'Des roulements verts pour les moteurs électriques', *le Journal de la Production*, 2009, (94), p. 43
- [154] IEC 60034-2-1: 'Rotating electrical machines. Part 2.1- Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)', 2007
- [155] CEI 60034-2-1: 'Rotating electrical machines. Part 2.1- Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)', 2007
- [156] A. Belot: 'Calcul des machines électriques tournantes (Calculation of rotating electrical machines, in French)', 1976
- [157] S. Hlioui: 'Étude d'une Machine Synchrone à Double Excitation, Contribution à la mise en place d'une plate-forme de logiciels en vue d'un dimensionnement optimal', Thèse, Génie électrique, Université de Technologie, Belfort-Montbéliard, 2008
- [158] J.F. Heuillard: 'Machines synchrone, dimensionnement électromagnétique', *Techniques de l'Ingénieur*, 1982 (D495A),
- [159] P.L. Cochran: 'Polyphase Induction Motors - Analysis, Design, and Application', Marcel Dekker, 675 pages, ISBN 0-8247-4, 1989
- [160] Simens. Elektromotory, "Induction motors 7AA series, Frame sizes 56-90," ed. Mohelnice, pp. 1-16.
- [161] CEI60317-01: 'Spécifications pour types particuliers de fils de bobinage. Exigences générales-Fils en section circulaire en cuivre émaillé ', 2008
- [162] ATde.Almeida: 'EUP Lot 11 Motors'. University of Coimbra, 18th February 2008
- [163] M. Kostenko and L. Piotrovski: 'Machines à courant alternatif', ed: Editions Mir Moscou, 1969
- [164] G. Bertotti: 'General properties of power losses in soft ferromagnetic materials', *IEEE Transaction on magnetics*, 1988, 24, (1), pp. 621-630

Résumé

Environ 300 millions de moteurs électriques, de puissance moyenne comprise entre 0,75 kW et 300 kW, sont utilisés dans l'industrie, l'infrastructure et les grands bâtiments. En plus, 30 millions sont renouvelés chaque année. En France, l'énergie électrique consommée par ces moteurs représente environ deux-tiers l'énergie électrique consommée dans l'industrie. Une amélioration, même faible, des performances environnementales de chaque unité apporte donc des gains environnementaux conséquents. La démarche d'éco-conception d'une machine électrique permet d'introduire, contrairement aux autres démarches classiques, les aspects environnementaux lors de la conception de la machine en tenant compte de toutes les phases du cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières nécessaires à la fabrication des pièces de la machine jusqu'à son démantèlement et son recyclage. Cette démarche permet de concevoir une machine électrique avec un meilleur écobilan global. Dans ce travail, un outil performant destiné à l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), prenant en compte plusieurs critères d'impacts afin d'éviter le transfert de pollution d'un critère à l'autre, a été utilisé pour améliorer significativement les performances éco-énergétiques des moteurs électriques. Un premier prototype de moteur « vert » réalisé avec de nouveaux concepts a été fabriqué et comparé à une machine de référence. Sa réalisation a été dictée par le souci de réduire au maximum son empreinte environnementale en utilisant des matériaux plus respectueux de l'environnement, mais aussi en augmentant son efficacité énergétique. Le prototype est ainsi fabriqué à base de tôle à grains orientés, de fil émaillé UV sans solvant, de plastique d'origine végétale et de roulements éco-énergétiques. Ce moteur prototype possède une haute éco-efficacité énergétique puisque son rendement est augmenté de l'ordre de trois points par rapport au moteur standard, sans augmenter sa masse, de plus il comporte un système d'isolation qui n'utilise pas de solvant et des plastiques biosourcés.

Mot – clés: éco-conception, moteur asynchrone, éco-efficacité énergétique, type de service, tôles magnétiques, écobilan global, analyse de cycle de vie, impact environnemental, fil émaillé, bio-polymère.

Abstract

Approximately 300 million of electric motors, with average power range from 0.75 kW to 300 kW, are used in industry, infrastructure and large buildings. In addition, 30 millions are renewed each year. In France, the electrical power consumed by these motors is about two-third of the electrical energy consumed in the industry. Thus, an improvement, even small, of the environmental performance of each motor would provide substantial environmental benefits. Contrary to the conventional approaches, the eco-design of an electrical machine can introduce environmental aspects during the design of the machine, taking into account all phases of the life cycle from the extraction of raw materials to the decommissioning and the recycling. This approach has been applied in this study to design an electrical motor, which has a better global energetic eco-balance. Therefore, a Life Cycle Analysis (LCA) tool is used; it takes into account several impact criteria to avoid pollution transfers from one criterion to another. A first "Green" prototype motor made with a high energetic eco-efficiency was fabricated and tested. The study was dictated by the need to minimize its global environmental impact by using materials more environmentally friendly, but also in order to increase its energy efficiency. The prototype is made with a grain oriented steel sheets, an enameled wire polymerized by UV and without solvents, some plastic based on biopolymers and with eco-energetic bearings. The eco-designed motor has a high energetic eco-efficiency; its performance is increased by about 3 % compared to the standard motor and without increasing its mass.

Keywords: eco-design, induction motor, energetic eco-efficiency, service type, magnetic sheets, global eco-balance, life cycle assessment, environmental impact, enameled wire, biopolymer.