HAL
open science

Eco-conception : de nouveaux critères de conception en électrotechnique pour le développement durable

Vincent Debusschere, Bernard Multon, Hamid Ben Ahmed

To cite this version:

Vincent Debusschere, Bernard Multon, Hamid Ben Ahmed. Eco-conception : de nouveaux critères de conception en électrotechnique pour le développement durable. La Revue 3E.I, 2010, pp.36-47. hal-00676235

HAL Id: hal-00676235

https://hal.science/hal-00676235v1

Submitted on 4 Mar 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Revue 3EI, juin 2010., pp.36-47

Eco-conception : de nouveaux critères de conception en électrotechnique pour le développement durable

V. DEBUSSCHERE, B. MULTON, H. BEN AHMED
SATIE, ENS Cachan Bretagne, CNRS, UEB, av Robert Schuman, F-35170 Bruz

Résumé : Les systèmes électrotechniques, qu'ils produisent, transportent ou consomment de l'énergie, contribuent massivement aux perturbations environnementales de l'humanité. Ils nécessitent des matières premières coûteuses pour leur fabrication puis, bien qu'ils aient généralement de bons rendements, dissipent de l'énergie en chaleur. Après avoir fait un point rapide sur l'impact environnemental des activités énergétiques et électriques, les auteurs mettent en relief quelques effets des limites de ressources en matières premières. Ensuite, ils précisent les notions d'analyse sur cycle de vie et d'éco-conception qui peuvent permettre de minimiser les impacts environnementaux des dispositifs concernés. L'éco-conception consiste à optimiser le dimensionnement de composants ou de systèmes, voire de services, en vue de minimiser leurs impacts environnementaux, les optimisations sont donc multicritères. Dans le contexte des systèmes électriques, le critère d'énergie globale sur cycle de vie est privilégié et les auteurs présentent un exemple faisant l'objet de travaux de recherche : un moteur de volet roulant. Cet exemple permet de mettre en évidence la problématique générale d'un éco-dimensionnement sur un cas concret.

1. L'impact environnemental des systèmes électriques

La première partie de ce papier est issue d'un article paru dans la revue REE en 2008 [MUL_08] dont les données ont été mises à jour.

D'après la méthode (ou concept) de l'empreinte écologique [REE_92], les activités énergétiques humaines pèsent pour plus de la moitié de l'impact global. La figure 1, issue du rapport « Planète Vivante » du WWF [WWF_06] montre l'évolution de l'empreinte écologique mondiale depuis 1960, notons que la surface biologiquement productive de la planète est de 11 milliards d'hectares (Gha), valeurs dépassées depuis 1990 et que nous consommons pour nos seules activités énergétiques environ 7 Gha.

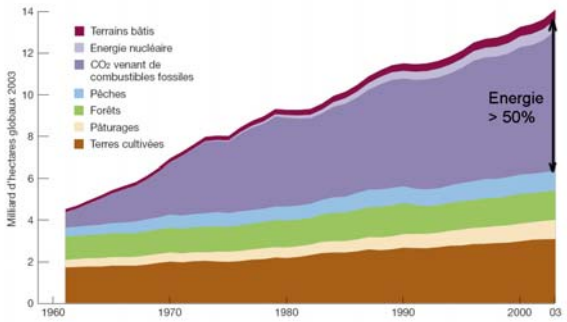

Figure 1 : *Empreinte écologique, part des activités énergétiques [WWF_06]*

La consommation mondiale d'énergie primaire [IEA_09] a augmenté à un rythme élevé durant la dernière décennie (2,5% entre 2006 et 2007, et 3,3% par an en moyenne depuis 2001) et aurait diminué en 2009 (probablement -2%) « grâce » à la crise économique. Dans ce contexte, la production d'électricité augmente à un rythme encore plus soutenu : 4% entre 2007 et 2006 (avec une moyenne d'environ 4% par an sur 10 ans) et sans décroissance en 2009. Autrement dit, la part de l'électricité croît et, comme sa production est toujours réalisée très majoritairement par des procédés à faible rendement (procédés thermodynamiques) et à fort impact environnemental, elle pèse de plus en plus lourd dans l'empreinte écologique. Pour 19 800 TWh électriques produits dans le monde en 2007, il a fallu consommer environ 44 000 TWh primaires soit 32% des 140 000 TWh (ou 12 Gtep) d'énergie primaire commerciale globalement convertie cette même année. Et, compte tenu des pertes de transport et de distribution, sur ces 19 800 TWh, seulement 17 100 ont été « vendus » aux consommateurs à différents niveaux de tension.

Ainsi l'électricité finale, qui représente 17,8% de l'ensemble des produits énergétiques finaux, consomme pour sa production quasiment un tiers de l'énergie primaire mondiale. La figure 2 donne la répartition des ressources d'énergie primaires consommées au niveau mondial ainsi que leurs proportions en énergie finale, la place de l'électricité y est également mise en évidence. Enfin la figure 3

montre que l'électricité est produite à plus de 80% à partir de ressources non renouvelables (combustibles fossiles carbonés et uranium). On peut ainsi conclure à partir de cet ensemble de données que les dispositifs qui produisent de l'électricité comme ceux qui la consomment ont un impact environnemental tout à fait conséquent. Si l'on ajoute le fait qu'il est très probable que l'électricité soit de plus en plus utilisée dans le domaine des transports (d'ailleurs pour améliorer les bilans énergétiques), ce poids va encore s'accroître sans qu'il apparaisse dans les statistiques de la production mondiale qui ne s'intéresse qu'à l'électricité distribuée sur les réseaux. Il se révèle ainsi indispensable d'optimiser les chaînes de conversion électrique sur des critères plus globaux, au-delà du rendement de conversion stricto sensu, afin de minimiser leur impact environnemental.

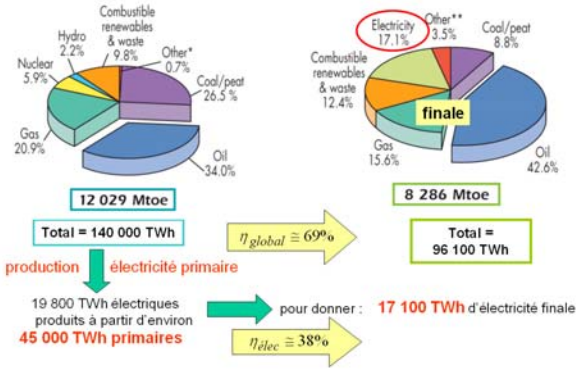

Figure 2 : *Répartition des ressources consommées, au niveau mondial, en énergie primaire et finale et place de l'électricité en 2007, à partir des données de [IAE_09]*

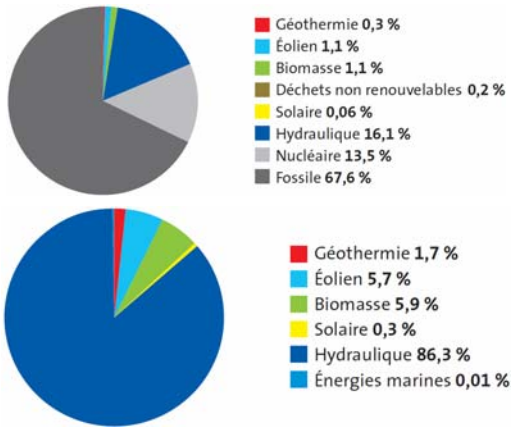

Figure 3 : *Répartition de la production d'électricité mondiale par sources primaires en 2007, totale (haut) et d'origine renouvelable (bas) [Observ'ER_09]*

2. L'épuisement des matières premières et l'augmentation de leurs prix

Les matières premières consommées pour la production d'énergie comme celles utilisées pour la construction des dispositifs électriques sont généralement non renouvelables. Dans le domaine de la production d'énergie, les combustibles fossiles et l'uranium sont en quantités très limitées [MUL_03], la croissance de la demande et l'épuisement des ressources conduisent, entre autres conséquences, à une flambée des prix qui, hormis quelques classiques soubresauts, devrait s'amplifier dans les années à venir, jusqu'à ce que nous ayons réalisé les transitions nécessaires… La figure 4 montre les fluctuations de cours du gaz naturel, du pétrole et de l'uranium et leur tendance inéluctable à une forte croissance.

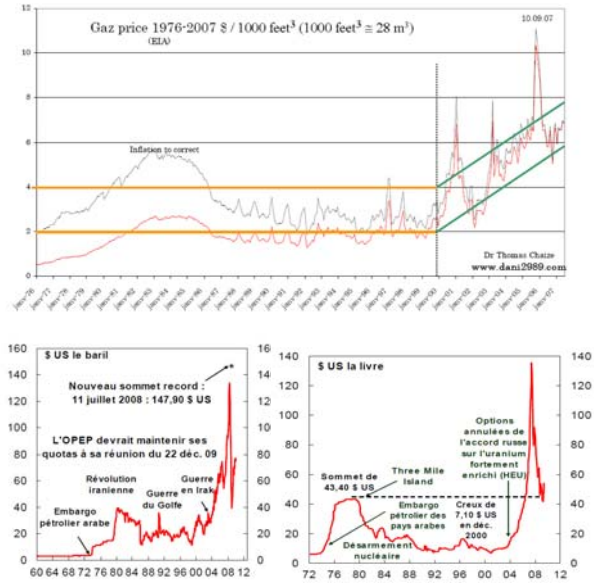

Figure 4 : *Evolution des prix des matières premières énergétiques : gaz [CHA_07], pétrole et uranium [SCOT_09]*

En ce qui concerne les matières premières exploitées dans la fabrication des systèmes électriques, principalement les métaux (acier, cuivre, aluminium, nickel…), leurs prix augmentent également rapidement comme en témoigne la figure 5 (le prix de l'aluminium, non représenté ici, a atteint fin 2007 2,5 €/kg avec un quasi-doublement en 5 ans). Le recyclage de ces matières premières va devenir une nécessité absolue. De ce point de vue l'aluminium est exemplaire, en Europe il est recyclé à plus de 70% (30% au niveau mondial), l'aluminium recyclé ne nécessite que 5% de l'énergie nécessaire pour le produire à partir de la bauxite. Le cuivre se recycle également très bien, mais sa séparation des objets dans lesquels il se trouve n'est pas toujours aisée et son recyclage n'est pas encore suffisant. Quant à l'acier, aujourd'hui environ la moitié de la production mondiale provient des ferrailles recyclées.

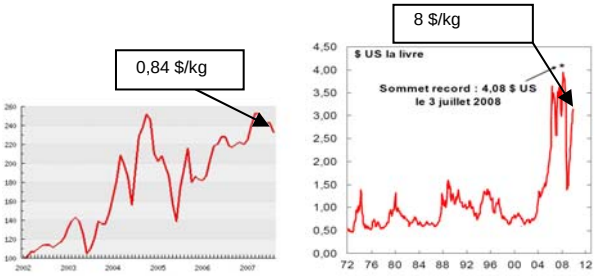

Figure 5 : *Evolution des prix de quelques matières premières utilisées dans la construction de systèmes énergétiques : acier et cuivre [SCOT_09]*

En somme pour atteindre les objectifs d'une civilisation au développement réellement « soutenable », il sera nécessaire de faire appel aux ressources énergétiques renouvelables largement capables de satisfaire l'ensemble des besoins de l'humanité (le rayonnement solaire annuel capté à la surface du sol représente 8000 fois la consommation mondiale d'énergie primaire actuelle ! [MUL_03]) et d'entrer dans une logique de recyclage total de nos matières premières de construction, ce qui aura d'ailleurs comme conséquence de réduire la consommation énergétique industrielle de fabrication de ces matières.

3. Analyses sur cycle de vie, différentes situations typiques et éco-conception

Les premières études concernant des aspects du cycle de vie de produits et de matériaux datent de la fin des années 60, avec un intérêt plus particulier pour l'efficacité énergétique. Peu à peu, il a été incorporé à ces études d'autres types d'impacts sur l'environnement, comme la production de déchets, ou la pollution des sols. Mais la complexité des mesures et la difficulté de comparaison des impacts entre eux n'ont pas favorisé le développement à court terme des analyses sur cycle de vie (ACV).

Les méthodes ACV ont donc suivi une lente émergence jusqu'au milieu des années 90 où une première normalisation a été mise au point en 1996 : la norme ISO 14001 « management environnemental ». Cette norme, révisée en 2004 [ISO_04], propose aux entreprises les méthodes de gestion et d'organisation visant à minimiser les impacts sur l'environnement de leurs activités sur site de production, de prévenir les incidents et de fixer un plan d'action pour améliorer leurs performances environnementales.

L'éco-conception des produits est concernée par la norme ISO 14044 qui propose notamment une définition de l'analyse sur cycle de vie dont nous utiliserons le principe dans la suite de ce papier. Avec le développement de son application dans les entreprises et dans les laboratoires par des études de cas plus poussées, l'analyse sur cycle de vie devient le sujet central de groupes de travail et d'initiatives de développement [UDO_05]. Cet outil atteint donc une maturité suffisante pour envisager aujourd'hui de l'utiliser dans l'optimisation de la conception de systèmes électromagnétiques de conversion d'énergie.

Notons qu'en termes purement économiques, les « électriciens » sont déjà habitués à effectuer des optimisations de dimensionnement pour minimiser la dépense sur la vie d'un système en comptabilisant l'investissement et les pertes énergétiques [JAR_06], par exemple pour des transformateurs de distribution, des moteurs industriels, des lignes électriques, etc... En effet, le coût des pertes sur la vie d'un système électrique fonctionnant quasiment en continu, même si les rendements sont excellents, ont un poids considérable dans le coût total sur cycle de vie. Ces pertes encouragent à investir dans des dispositifs de conversion ou de transport à dimensionnement optimisé, sachant qu'améliorer le rendement se traduit par une augmentation de la quantité de matières premières constituant ces dispositifs et donc de leur coût d'investissement.

Les critères d'évaluation sur ACV sont très nombreux. Ils permettent des comparaisons quantitatives et qualitatives, mais rendent extrêmement difficile une « éco-optimisation » du dimensionnement des systèmes et services qu'il est nécessaire d'éco-concevoir. C'est la raison pour laquelle, dans une démarche d'éco-conception, nous proposons de limiter le nombre de critères aux plus importants, par exemple le « L'énergie globale sur cycle de vie » (en anglais « Global Energy Requirement » ou GER) correspondant à la totalité de la dépense énergétique sur cycle de vie : de la production de matières premières (à partir de l'extraction et/ou de matériaux recyclés) à la déconstruction et la récupération des matériaux, en incluant bien sûr la consommation propre éventuelle d'énergie. Un autre critère parfois retenu concerne les rejets de gaz à effet de serre quantifiés en équivalent CO_2 (ou en équivalent carbone) sur cycle de vie, la méthode proposée par l'ADEME s'appelle le *Bilan Carbone*.

La figure 6 montre schématiquement les différentes étapes de la vie d'un produit électrique et les énergies consommées aux différentes étapes de sa vie, dont la somme permet d'évaluer le contenu énergétique global.

Figure 6 : *Schéma représentatif de l'évaluation du « contenu énergétique » sur le cycle de vie d'un produit électrique consommateur d'énergie*

Plusieurs logiciels permettant l'évaluation des impacts environnementaux sur cycle de vie existent, par exemple *SIMPRO*, *EIME* ou *Bilan Produit*, proposé gratuitement par l'ADEME [BP_08]. Mais s'ils sont très utiles pour l'analyse, la qualification, la comparaison de produits et leur amélioration, ils ne permettent pas au sens propre d'effectuer des dimensionnements optimisés tels que nous l'entendons dans le domaine de la recherche. En revanche les bases de données exploitées dans ces logiciels, concernant les matériaux et les process, sont très utiles. Le tableau 1 donne des exemples de coûts énergétiques de certaines matières issus de sources variées et met en évidence des dispersions importantes sur leurs valeurs.

Matériaux/Source	**Jolliet [CRE_05]** ***Energie primaire non renouvelable (Suisse)***	**Schleisner [SCH_00]** ***Energie primaire totale (données danoises)***	**Gutowski [GUT_04]** ***Typical Energy Requirements (USA)***
Aluminium	189	32 à 45	227 à 342
Aluminium recyclé	19		?
Acier ordinaire	32	21-31	20-50
Cuivre	108	78	60-125
Polyéthylène	83-95	105	85-115
Béton	0,89 (non armé)	3.7 (type non défini)	?

Tableau 1 : *Tableaux de données énergétiques (MJ/kg) pour la production de matières première*

Ces dispersions ont pour origine différentes raisons : le type d'énergie (primaire non renouvelable, primaire toutes ressources, finale usine…), la zone géographique (il s'agit de moyennes généralement effectuées sur un pays ou une zone géographique ou économique), les process de fabrication, etc… En outre, ces données sont amenées à évoluer avec l'accroissement de la part des matières premières issues du recyclage et avec l'amélioration de l'efficacité énergétique des procédés de production. Dès lors, il est indispensable de conserver un regard très critique sur les données et d'effectuer des études de sensibilité sur les résultats des optimisations d'éco-conception.

Le problème qui nous intéresse ici est l'optimisation du dimensionnement de dispositifs ou systèmes électriques en vue de minimiser leur impact environnemental sur cycle de vie. Nous venons d'aborder le problème des critères et des données, mais d'autres questions se posent concernant les spécificités des dispositifs étudiés et la définition de leur durée de vie.

Quelques exemples vont nous permettre de bien prendre conscience des difficultés.

Tout d'abord les systèmes de production d'électricité, dont nous avons vu au début de ce papier qu'ils étaient fortement consommateurs de ressources « épuisables » et générateurs de diverses pollutions, nécessitent des améliorations pour minimiser leurs impacts environnementaux : consommation de matières premières non renouvelables, consommation globale d'énergie (investissement, pertes et démantèlement), rejets polluants... Les nouveaux systèmes de production décentralisée d'origine renouvelable n'échappent pas à cette analyse car, même s'ils ne consomment pas de matières premières énergétiques pour la production d'électricité durant leur vie, ils nécessitent de l'énergie et des matières premières lors de leur fabrication, leur entretien et leur déconstruction et génèrent des perturbations spécifiques. Les pertes énergétiques liées par exemple au nécessaire stockage sont indirectement prises en compte par le fait qu'il est nécessaire d'augmenter en conséquence la productivité du système et donc le coût d'investissement du générateur.

Ensuite, les composants (eux-mêmes des sous-systèmes) qui consomment de l'électricité (moteurs, lampes…), en fonction de leurs cycles d'utilisation, peuvent également faire l'objet d'une optimisation de dimensionnement à la conception pour minimiser leur impact environnemental sur cycle de vie. Il faut toutefois noter que, pour un service rendu, il est souvent très intéressant d'étudier le système complet dans lequel s'insère le composant car l'amélioration apportée par une analyse globale peut être très supérieure à celle apportée sur le composant seul. Par exemple, la lampe et son luminaire, le moteur et sa charge entraînée pour satisfaire un service (ventilation, broyage…). Néanmoins, l'amélioration du composant électrique seul, donc dans une logique de découplage de son environnement, constitue déjà un progrès significatif. Notons que nous avons cité en exemple les moteurs et l'éclairage car les moteurs industriels consomment 65% de toute l'énergie électrique

industrielle et que l'éclairage consomme 20% de l'électricité mondiale.

Le dernier exemple que nous allons considérer est celui des transports alimentés électriquement ou dans lesquels l'électricité est produite à bord et utilisée pour améliorer le bilan énergétique global à partir d'un combustible primaire.

Il va de soi qu'une procédure d'éco-conception nécessite de connaître au mieux le cycle de vie des produits, car celui-ci va conditionner sévèrement le problème, c'est sans doute l'un des points les plus durs de ce type d'étude ou alors l'une des hypothèses les plus critiquables. Le cycle de vie comprend à la fois les profils de fonctionnement (par exemple de consommation ou de production) mais également la durée de vie. Ces quelques exemples vont nous montrer la diversité des situations :

- l'éolienne que l'on démantèle bien avant sa fin de vie car le contexte économique a fait qu'elle est déjà amortie et qu'il est devenu plus favorable de la remplacer par une machine plus productive;
- l'outil électrique domestique dont l'usage sera très variable entre celui qui ne servira pas du tout et celui qui sera utilisé aussi intensivement qu'un matériel professionnel;
- l'évolution des comportements, elle-même liée à la prise de conscience de la nécessité du développement durable et qui fait que la consommation sur la vie de l'objet en question pourra être moindre par rapport aux prévisions initiales.

La durée de vie d'un dispositif électrique est donc liée à de nombreux paramètres dont beaucoup sont humains. On se propose de ne retenir que les deux cas suivants :

- économique : amortissement, obsolescence technologique…
- technique : vieillissement des matériaux liés aux échauffements, aux cyclages, etc…, dans ce cas il y a couplage fort lors de la procédure de conception entre les modèles de vieillissement et les modèles de description physique du fonctionnement.

4. Exemples d'éco-dimensionnement avec critères d'énergie primaire sur cycle de vie et de masse des matériaux

Dans ce chapitre, nous présentons brièvement un exemple d'optimisation de dimensionnement de dispositif électrique illustrant la problématique de l'éco-conception. Cet exemple est issu d'une application industrielle commercialisée depuis plus de 25 ans par la société SOMFY [SOM_10], sous la forme d'une motorisation de volet roulant [DEB_09].

La méthodologie d'éco-dimensionnement concerne ainsi un composant électromagnétique particulier : une machine asynchrone monophasée à condensateur permanent alimentée directement par le réseau 230 V-50 Hz pour laquelle nous considérons deux objectifs contradictoires à minimiser :

- l'énergie (primaire) globale sur cycle de vie, qui représente un impact environnemental majeur à nos yeux dans le domaine des applications électrotechniques.
- la masse totale des parties actives, qui représente indirectement un autre impact environnemental, notamment à travers la consommation des ressources en matières premières.

Le calcul de l'énergie globale sur cycle de vie se fait en intégrant l'ensemble des pertes de fonctionnement (pertes Joule et fer) sur la durée d'utilisation réelle du moteur puis en ajoutant à cette valeur l'ensemble des coûts énergétiques accumulés sur les autres phases du cycle de vie, comme représenté figure 6. Il s'agit dans notre cas des coûts énergétiques d'extraction et de recyclage des matières premières, ainsi que de transport du moteur sur une distance type. Nous n'avons pas intégré à ce modèle les coûts de fabrication et de démontage par manque de données pertinentes à ce sujet. Notons que les pertes sont pondérées par l'inverse du rendement de production de l'électricité déterminer l'énergie primaire consommée. Le calcul de la masse des parties actives se fait à partir des masses volumiques et des volumes des différents matériaux mis en jeux dans la construction du moteur. Dans notre cas, il s'agit du fer, du cuivre et de l'aluminium.

Nous lançons une optimisation des dimensions par l'intermédiaire d'un algorithme d'optimisation qui va chercher à répartir un ensemble de solutions suivant un front de Pareto, minimisant ainsi au mieux les deux objectifs contradictoires [REG_03]. Cette optimisation se base sur un profil de charge défini à la journée puis répété artificiellement, par exemple pendant sept ans. Le profil d'une journée consiste dans notre cas en un certain nombre de cycles de montée-descente d'un volet roulant métallique de 2.5m de largeur et 2m de hauteur. Le nombre de cycles de montée-descente quotidien constitue ici un paramètre d'étude important. La figure 7 présente l'évolution du couple demandé au moteur sur un cycle de montée-descente, ainsi que la modélisation idéale qui en est faite lors des simulations. Compte tenu du rapport de réduction (imposé à une valeur fixe dans cette étude), la valeur

du couple maximal sur l'arbre du moteur vaut ici à 0,1Nm. Un cycle de montée dure environ 25 secondes.

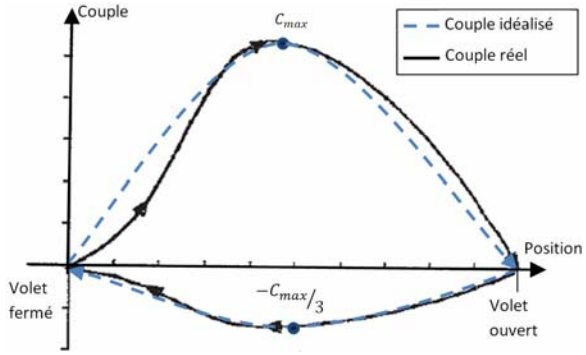

Figure 7 : *Evolution du couple sur un cycle de montée-descente du volet roulant*

Ce type de profil présente des sollicitations très brèves qui justifient la prise en compte des aspects thermiques transitoires. En effet, une modélisation thermique est nécessaire dans le calcul de la seule contrainte imposée à nos solutions d'optimisation, à savoir la température maximale atteinte par le bobinage lors d'une montée du rideau (fonctionnement le plus contraignant). Celle-ci est calculée en se plaçant dans l'hypothèse d'un échauffement purement adiabatique, tout à fait valable dans le cas de sollicitations aussi brèves. Nous supposons qu'entre chaque sollicitation le moteur a le temps de revenir à la température ambiante.

D'autre part le moteur présente un fonctionnement fortement saturé, impliquant sa modélisation en régime magnétique non linéaire par éléments finis 2D. Cette modélisation est effectuée sur le logiciel gratuit *FEMM* [FEMM_10].

La figure 8 montre une vue générale du moteur ainsi qu'une vue de coupe dessinée sous *FEMM* sur laquelle il est possible de constater les niveaux élevés d'induction (jusqu'à 2T dans les dents).

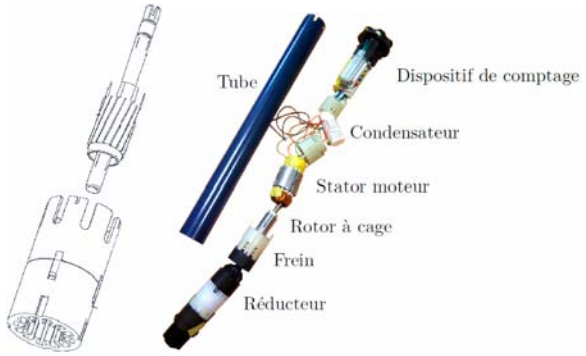

Figure 8 : *Dessin et vue générale du moteur.*

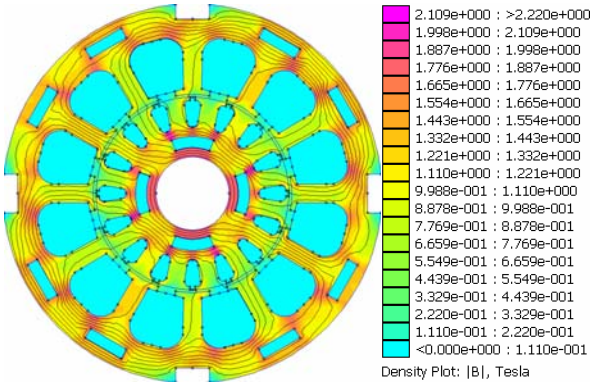

Figure 9 : *Vue de coupe ainsi que niveaux d'induction magnétique dans des conditions d'utilisation typiques*

L'alimentation du moteur est représentée sur la figure 10. Elle fait apparaitre un condensateur de déphasage entre les deux phases, alimentées par le réseau domestique. Dans les optimisations l'alimentation a été supposée parfaitement équilibrée sur la plage de vitesses considérée, c'est-à-dire une amplitude de courant identique entre les deux phases et un déphasage de 90°. Cette hypothèse est validée expérimentalement sur les moteurs réellement vendus par la société SOMFY entre 2000 et 3000 rpm, comme nous pouvons le constater sur la figure 11. Ceci s'explique par une forte impédance statorique dû à la longueur active du moteur, ainsi qu'une impédance rotorique peu influente.

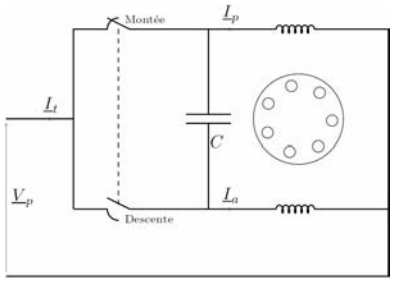

Figure 10 : *Schéma d'alimentation de la motorisation du volet roulant.*

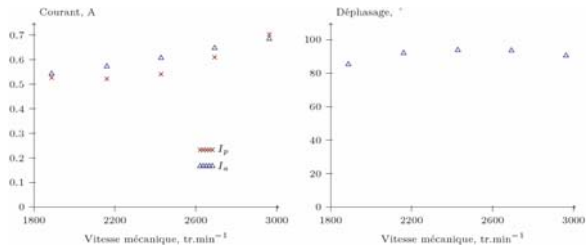

Figure 11 : *Amplitude et déphasage entre les courants principaux et secondaires entre 2000 et 3000 rpm pour un moteur de 70 mm de longueur active avec un condensateur de déphasage de 5,5µF.*

Nous donnons enfin dans le tableau 2 les ordres de grandeurs caractéristiques pour deux moteurs extrêmes

d'une gamme de moteurs de volet roulants produits par la société SOMFY.

La, mm	Ns	C, uF	P, W	C, Nm (sortie réducteur)	η max, %	T max, °C
35	558	3,3	90	50	17	140
100	240	7	240	8	30	150

Table 2 : *Données caractéristiques des moteurs extrêmes sur la gamme des moteurs étudiés (diamètre extérieur 42 mm et diamètre d'entrefer 21 mm).*

Compte tenu des contraintes du problème, seuls deux paramètres d'optimisation sont examinés : la longueur active et le nombre de spires.

Nous constatons sur les premiers résultats d'optimisation (avec un seul cycle par jour), présentés à la figure 12, que la prise en compte du cycle de vie du moteur plutôt que de sa seule phase de fonctionnement limite les solutions d'optimisation à une masse optimale pour laquelle l'énergie globale sur cycle de vie est minimale. En effet, au-delà de cette masse, la diminution des pertes de fonctionnement est compensée par les autres coûts énergétiques du cycle de vie du moteur, proportionnels quant à eux à la masse du moteur. La solution de masse minimale (à gauche) est conditionnée par la limite thermique en régime transitoire. Pour les autres solutions de masse plus élevée, cette limite n'est pas atteinte.

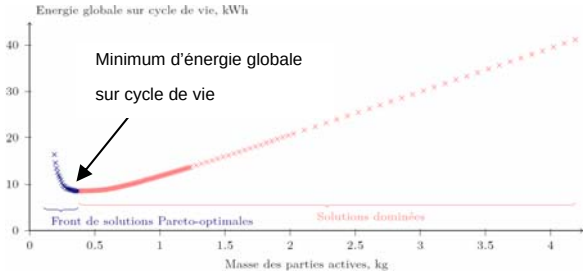

Figure 12 : *Résultats d'optimisation. Solutions optimales et solutions dominées pour une utilisation quotidienne d'un seul cycle de montée-descente*

Un point d'étude intéressant concerne l'impact du nombre d'utilisations par jour sur la répartition des solutions optimales. En effet, il est tout à fait envisageable, par exemple dans le cas de bâtiments, d'avoir une couverture des interfaces avec l'extérieur variable selon la météorologie. Ce type d'usage peut entrainer plusieurs cycles de fonctionnement des moteurs par jour, mais peut représenter un gain énergétique sur une échelle plus large, par exemple au niveau des coûts de chauffage et de climatisation du bâtiment.

Nous présentons à la figure 13 les résultats de deux optimisations ayant pour critères contradictoires la masse active et l'énergie sur cycle de vie. La première optimisation (en rouge sur la figure) considère, comme pour la figure 12, que le moteur effectue 1 cycle par jour. La seconde optimisation considère qu'il en effectue 5 par jours. Il est bien évident que l'énergie sur cycle de vie est plus importante dans le cas d'un fonctionnement à 5 cycles par jour compte tenu du fait que les pertes de fonctionnement (liée à la durée de fonctionnement du moteur) ont augmenté.

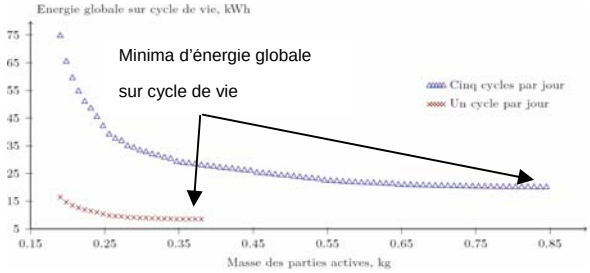

Figure 13 : *Solutions optimales pour une utilisation quotidienne d'un seul cycle de montée-descente et de cinq cycles.*

Pour la solution optimale minimisant l'énergie globale sur cycle de vie (solution extrême à droite du front de Pareto), un facteur cinq sur le nombre de cycles n'a pas un impact d'un facteur cinq sur l'énergie, ni sur la masse. En effet, augmenter le nombre de cycles revient à augmenter l'énergie des pertes de fonctionnement mais pas celle liée à la masse. Or, la solution qui minimise l'énergie globale sur cycle de vie est celle où ces autres phases sont prépondérantes. A l'inverse, pour la solution de masse minimale (point à l'extrême gauche du Pareto), les pertes de fonctionnement sont prépondérantes dans l'énergie globale sur cycle de vie et donc le facteur cinq apparait.

Rapporté à la durée totale d'usage du moteur, la durée cumulée de fonctionnement est faible. Les moteurs présentant un ratio durée d'utilisation sur durée d'usage faible entrent dans une catégorie pour laquelle les critères de conception sur cycle de vie, en particulier le critère énergétique, sont appropriés. En effet, les pertes de fonctionnement ne présentent plus une contribution prépondérante dans l'énergie globale sur cycle de vie. Une conception basée sur la seule phase de fonctionnement est de ce fait inapproprié.

Le fait qu'une conception centrée sur la seule phase de fonctionnement soit insuffisante implique que le critère de rendement en fonctionnement (même sur cycle) soit, lui aussi, inadéquat. Nous avons défini ainsi, à l'occasion de l'étude de sensibilité au nombre de cycles par jour, la notion de rendement sur cycle de vie. Ce rendement énergétique étant basé sur l'ensemble du cycle de vie du moteur, il s'agit d'un rendement plus approprié aux applications

consommatrices d'énergie dont la durée cumulée de service est faible devant la durée de vie totale. Sa définition est proposée ci-dessous dans le cas d'un fonctionnement par cycles.

$$\eta_{cv} = \frac{\int_{fct} P_u dt}{\int_{fct} P_u dt + E_{acv}}$$

A service utile identique, la différence entre rendement sur cycle de fonctionnement et rendement sur cycle de vie va dépendre de la masse du moteur considéré. A masse identique, elle va dépendre du temps d'utilisation, ou plus généralement de l'application.

Comme le montre la figure 14, le rendement sur cycle de vie passe par un optimum (qui correspond au minimum d'énergie globale sur cycle de vie), ce qui n'est pas le cas du rendement sur cycle de fonctionnement. Ainsi il est tout à fait envisageable de produire des moteurs qui présentent de faibles rendements sur cycle de fonctionnement, sachant que leur rendement sur cycle de vie est optimal.

Nous constatons que la plage de solutions pour lesquelles le rendement sur cycle de vie est proche du rendement sur cycle de fonctionnement (au niveau des solutions de masse faible) augmente avec le nombre de cycles par jour. Il existera cependant toujours un optimum de rendement sur cycle de vie apparaissant à une masse optimale qui dépend de l'utilisation qui est faite du moteur.

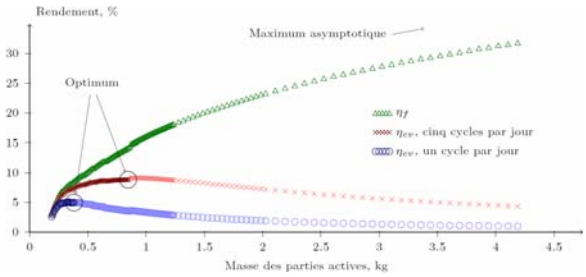

Figure 14 : *Rendement sur cycle de vie et rendement sur cycle de fonctionnement pour une utilisation quotidienne d'un cycle de montée-descente par jour et de cinq cycles.*

D'autres études de sensibilité ont été menées dans le cadre de ce travail de recherche [DEB_09]. Il s'agit d'étudier notamment la sensibilité des résultats d'optimisation aux différents coûts énergétiques élémentaires, à des variations des hypothèses de modélisation, à des changements des matériaux constitutifs, à la prise en compte d'un certain pourcentage de matériaux d'origine recyclée, etc…

L'ensemble de ces études souligne la grande diversité d'action sur la position des solutions d'énergie globale sur cycle de vie optimales, ainsi que sur la valeur de leur masse. La complexité de ces optimisations implique ainsi une sensibilité non négligeable aux conditions de modélisation et d'utilisation du moteur.

5. Conclusion

L'éco-conception constitue une démarche indispensable pour construire une civilisation viable sur une planète aux ressources limitées et à l'écosystème fragile. Elle nécessite de développer à la fois des modèles (énergétiques et de vieillissement) et des méthodes aptes à réaliser des optimisations sur des cycles longs et parfois complexes. Selon les cas, des simulations temporelles sont requises comme lorsqu'il existe un dispositif de stockage dans le système ou lorsque les fluctuations de températures doivent être prises en compte, mais certaines situations peuvent permettre de se satisfaire d'effectuer des sommes de régimes permanents ce qui peut alléger considérablement les temps de résolution. Nous avons vu également que la définition de la durée de vie constitue à elle seule un vaste problème. Enfin, notons que même si le développement des bases de données progresse, il manque encore des informations pour mener à bien l'éco-conception des systèmes électrotechniques.

Toutes ces situations doivent être évaluées grâce à des études de sensibilité, voire à des analyses de type économie dynamique où l'on peut tenter de prendre en compte l'introduction de nouvelles technologies et de comportements moins énergivores (par exemple ***:*** la possession de générateurs photovoltaïque sur le lieu de consommation accroît la prise de conscience), voire le changement climatique qui aura un effet sur la productibilité énergétique, comme sur la consommation des consommateurs, etc…

Les optimisations sur cycle de vie sont très sensibles à des paramètres par toujours maîtrisables, d'où l'importance de ne pas mener des études d'une précision absurde.

L'objet présenté dans le dernier chapitre est une machine asynchrone monophasée à condensateur permanent. Son utilisation présente un faible ratio durée cumulée d'utilisation sur durée totale d'usage, particulièrement pertinent, lors de l'étape de conception, pour prendre en compte des critères environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie. En effet, l'application ne requiert que quelques minutes de fonctionnement par jour.

Ces moteurs (en production depuis plus de 20 ans) sont déjà fortement optimisés d'un point de vue purement économique, ce qui n'a pas laissé beaucoup de latitude au niveau d'un nouveau dimensionnement.

Ainsi, lors de cette étude, ces moteurs (d'ailleurs difficiles à modéliser car fortement saturés) ont été modélisés en vue d'une optimisation portant sur deux paramètres : la longueur active et le nombre de spires. Cette optimisation avait pour but de minimiser l'énergie primaire consommée sur l'ensemble du cycle de vie du moteur, en négligeant la phase d'assemblage et de recyclage du moteur.

Par l'intermédiaire de la définition d'un rendement énergétique sur cycle de vie, nous avons ensuite souligné que ce type d'application ne peut être correctement défini par un rendement en fonctionnement. En effet, diminuer les pertes de fonctionnement au détriment d'une augmentation de la masse des parties actives a une contrepartie sur les coûts énergétiques des autres phases du cycle de vie, pénalisant le bilan environnemental du moteur. Ainsi l'augmentation du seul rendement en fonctionnement, sans autres considérations plus globale, n'est pas appropriée.

En somme, l'optimisation de la conception d'un produit sur cycle de vie est un problème particulièrement complexe avec des difficultés fondamentales de modélisation, de simulation, et d'optimisation, notamment si l'on se penche sur l'influence des comportements humains (sociologie).

L'enseignement des principes de l'analyse sur cycle de vie et des bases de l'éco-conception doit maintenant pénétrer massivement le système éducatif. Nous avons d'ailleurs présenté récemment le bilan d'une expérience au niveau du master à l'ENS de Cachan [DEB_10].

6. Bibliographie

[BP_08] Software Bilan Produit 2008, ADEME, http://www.ademe.fr/internet/bilan_produit/login.asp, visité en mars 2010.

[CHA_07] T. CHAIZE, « The price of the natural gaz, future », 10 sept. 2007; site web Dani2989 Matière 1ère, http://www.dani2989.com, visité en mars 2010.

[FEMM_10] D.C. Meeker, Finite Element Method Magnetics, Version 4.2 (04Nov2008 Build), http://femm.foster-miller.net, Visité en mars 2010.

[IAE_09] International Energy Agency, Keywords Energy Statistics, rapport 2009.

[ISO_04] Norme ISO 14001 : 2004 Système de management environnemental – Spécification et ligne directrices pour son utilisation.

[ISO_06] Norme ISO 14044 : 2006 Système de management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices.

[CRE_05] P. CRETTAZ, M. SAADÉ, O. JOLLIET, « Analyse du cycle de vie - Comprendre et réaliser un écobilan », Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2005.

[DEB_09] V DEBUSSCHERE, « Contributions méthodologiques à l'éco-conception des convertisseurs électromagnétiques d'énergie », thèse de doctorat, 2009, http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00443702/fr/, visité en mars 2010.

[DEB_10] V. DEBUSSCHERE, B. MULTON, H. BEN AHMED, C. RICORDEL, M.D. de CAYEUX, P. GOURRONC, Y. LEGUERN, « Enseignement en Eco-Conception : une expérience à l'ENS de Cachan », Conférence CETSIS 2010, Grenoble, mars. 2010, 10p.

[GUT_04] T.G. GUTOWSKI, « Design and Manufacturing for the Environment », in Handbook of Mechanical Engineering, Springer Verlag, 2004.

[JAR_06] J.A. JARDINI, C.M.V. TAHAN, E.L. FERRARI, S.U. AHN, « Selection of distribution transformer based on economic criteria », IEEE Trans. Pub no 438 - 14th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution part. 1. Contributions, Volume 6, 1997.

[MUL_03] B. MULTON, O. GERGAUD, G. ROBIN, H. BEN AHMED, « Ressources énergétiques et consommation humaine d'énergie », Techniques de l'Ingénieur, Traités de Génie Electrique, D3900, novembre 2003, 14p.

[MUL_08] B. MULTON, H. BEN AHMED, V. DEBUSSCHERE, J. SEIGNEURBIEUX, M. RUELLAN, Y. THIAUX, « Eco-conception : de nouveaux critères de conception en électrotechnique pour le développement durable », REE n°5, mai 2008, pp89-98.

[Observ'ER_09] Observ'ER, « Onzième inventaire de la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde », Edit. 2009.

[REE_92] W.E. REES, « Ecological footprints and appropriated carrying capacity : what urban economics leaves out », Environment and Urbanization, Vol. 4, No. 2, 1992, pp.121-130.

[REG_03] J. REGNIER, B. SARENI, X. ROBOAM, S. ASTIER, « Optimal design of electrical engineering systems using Pareto Genetic Algorithms », 10th European Conference on Power Electronics and Applications, Toulouse, 2003.

[SCH_00] L. SCHLEISNER, « Life cycle assessment of a wind farm and related externalities », Renewable Energy Journal, n°20, 2000, pp.279-288.

[SCOT_09] P.M. MOHR, « Indices des prix des produits de base de la Banque Scotia », bulletins mensuels, juin (uranium) et décembre (pétrole) 2009.

[SOM_10] Site internet de la société SOMFY, http://www.somfy.fr/accueil/decouvrir/nos-produits/volet-roulant.html, visité en mars 2010.

[UDO_05] H.A. UDO DE HAES, M. VAN ROOIJEN, « Life Cycle Approaches – The road from analysis to practice », UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2005.

[WWF_06] WWF, Rapport planète vivante, Edit. 2006.