HAL
open science

L'éco-conception dans le génie électrique : application au cas du transformateur

Vincent Debusschere, Hamid Ben Ahmed, Bernard Multon

▶ **To cite this version:**

Vincent Debusschere, Hamid Ben Ahmed, Bernard Multon. L'éco-conception dans le génie électrique : application au cas du transformateur. Electrotechnique du Futur 2005, Sep 2007, TOULOUSE, France. 9p. hal-00676128

HAL Id: hal-00676128

https://hal.science/hal-00676128v1

Submitted on 3 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.

L'éco-conception dans le génie électrique : application au cas du transformateur

V. Debusschère, vincent.debusschere@bretagne.ens-cachan.fr
H. Ben Ahmed, benahmed@bretagne.ens-cachan.fr
B. Multon, multon@bretagne.ens-cachan.fr
CNRS, SATIE, ENS Cachan Antenne de Bretagne
Campus de Ker Lann, Avenue Robert Shuman F35170 Bruz
Tel : 33 2 99 05 52 62 – Fax : 33 2 99 05 93 28

Abstract - *This paper presents the first results of the eco-design problematic in case of one of the simplest electromagnetic energy converter: the single-phase electric transformer connected to a constant frequency and voltage power supply. The optimization of its sizes is led with the following objectives: the active mass and the global life cycle energy cost. We first compare optimization's results to those with "classic" mass versus power losses (copper and iron losses) optimization for several times of use ratio. This leads to recognition of the significant impact of the life cycle energy on the arrangement of the optimal Pareto fronts, explained by conflicting energy contribution in the life cycle global energy cost objective. Then we logically observe that the life cycle assessment impact is more significant when the real use duration is smaller than the lifetime and in this case we have to use a transient thermal model in order to have more realistic results. After that, the sensitivity of the optimization's results to the elementary raw materials energy costs is considered with the same times of use ratio. At last, some optimizations are run with a different raw material: aluminium instead of copper for the windings.*

Résumé - *Ce papier présente les premiers résultats de la problématique de l'éco-conception dans le cas du plus simple des convertisseurs électromagnétiques : le transformateur monophasé connecté à un réseau à tension et fréquence fixes. L'optimisation de ses dimensions s'obtient par la minimisation de deux objectifs contradictoires, la masse des parties actives et le coût énergétique global sur cycle de vie. Nous comparons dans un premier temps ces résultats d'optimisation à ceux d'optimisation plus « classique » (où les seules pertes de fonctionnement sont considérées). Ceci nous amène à reconnaître l'impact significatif de l'analyse sur cycle de vie sur la disposition des fronts de Pareto. Nous observons ensuite que cet impact est d'autant plus important que le temps de sollicitation du transformateur est faible devant son temps total d'utilisation C'est ici qu'intervient le choix d'utiliser ou non un modèle thermique transitoire, permettant une modélisation et donc un dimensionnement plus réaliste. La sensibilité des résultats d'optimisation à des variations de coûts élémentaires énergétique reste faible mais dépendante du profil de charge. Par contre, la sensibilité des résultats est plus importante vis-à-vis d'un changement de matériau de bobinage (aluminium au lieu de cuivre).*

Mots clés *– Eco-conception, transformateur, convertisseurs électromagnétiques, analyse sur cycle de vie (ACV), optimisation multi-objectifs.*

I. Introduction

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.

Cette discipline a 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 [1], propose aux entreprises les méthodes de gestion et d'organisation visant à minimiser les impacts de leurs activités ou leur produit sur l'environnement, de prévenir les incidents et de fixer un plan d'action pour améliorer leurs performances environnementales.

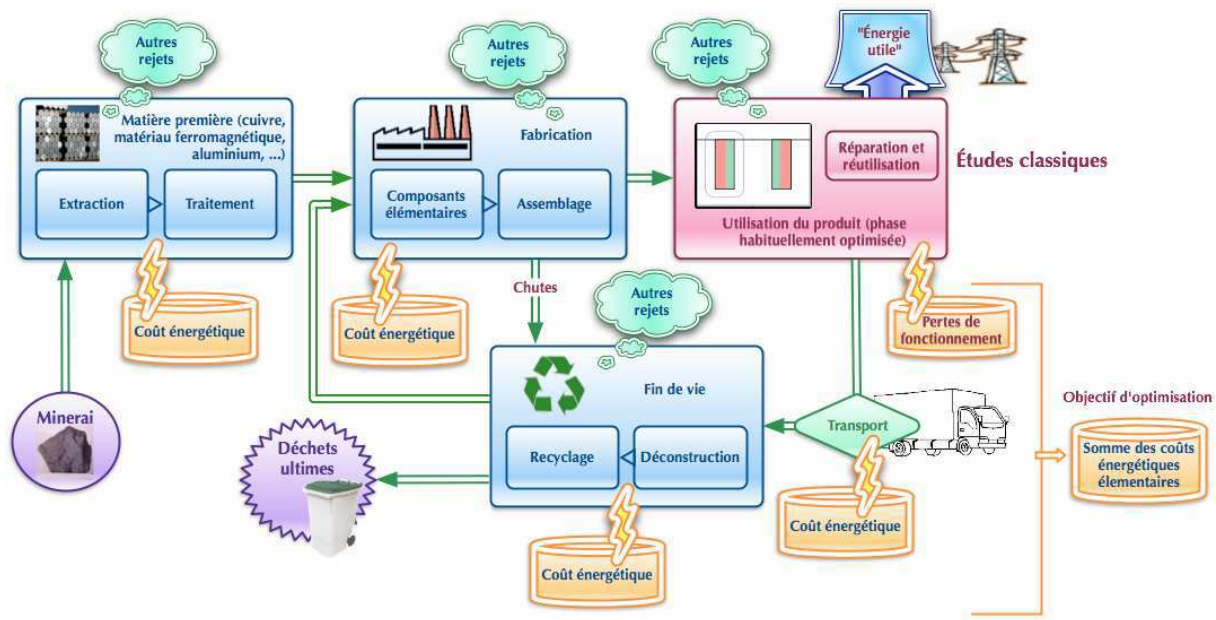


Fig. 1. Cycle de vie d'un système électro-magnétique et coût énergétique global (critère principal d'optimisation).

Cet ensemble de normes propose ainsi une définition de l'analyse sur cycle de vie, dont nous utiliserons le principe dans notre étude [2]. 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 [3]. 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.

II. Modèle et méthode

A. Eco-conception

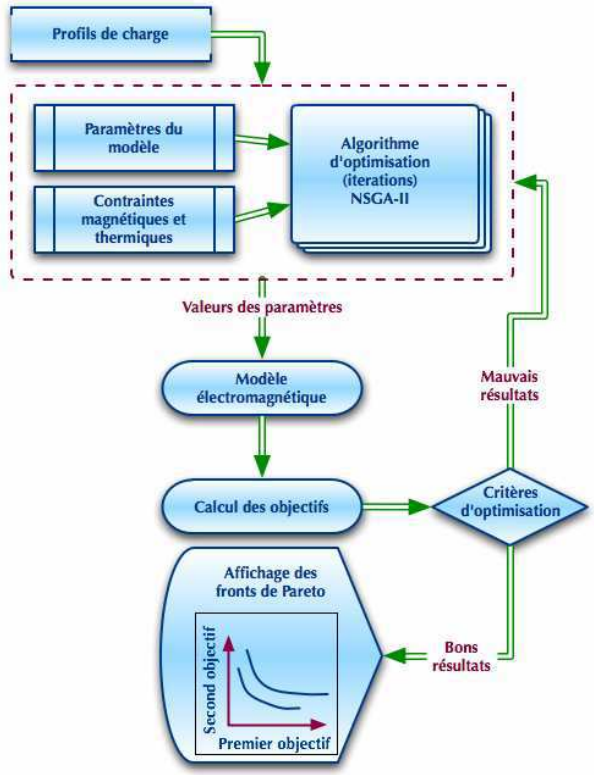


Fig. 2. Synoptique d'optimisation

La maîtrise de l'énergie devenant un thème d'une actualité plus préoccupante chaque jour, il apparaît nécessaire d'aborder la conception des convertisseurs électriques non plus sous le seul angle du rendement électrique en fonctionnement ou de l'investissement financier, mais plutôt sous l'angle du coût énergétique total sur cycle de vie. Le cycle de vie (Fig. 1) regroupe l'ensemble des étapes successives par lesquelles va passer le produit depuis sa fabrication (incluant l'extraction des matières premières, le transport) à sa mise à dépôt (démantèlement et recyclage des matériaux).

L'éco-conception peut avoir plusieurs définitions suivant les outils choisis pour la réaliser. Il s'agira dans notre cas d'une conception «classique» sur cycle à laquelle nous étendons le critère énergétique à la vie entière du produit.

Les deux objectifs que nous allons chercher à minimiser dans cette étude sont l'énergie globale sur cycle de vie (que nous noterons $\mathbf{E_{glob}}$) et la masse des parties actives $\mathbf{M_a}$. Notre transformateur est réduit à ses deux composants actifs élémentaires : le circuit ferromagnétique et les bobinages, autrement les parties « inactives » ne sont ici pas considérées.

L'outil d'optimisation utilisé est un algorithme évolutionnaire multi-objectifs, le NSGA-II [4, 5]. Il fonctionne sur le principe de la recherche du front de Pareto, qui propose un éventail de structures intermédiaires permettant de minimiser des objectifs contradictoires en procédant par itérations successives utilisant un algorithme génétique (Fig. 2).
Notons que le but de cette étude est de mettre en place une méthodologie d'éco-conception et non pas d'obtenir une structure de transformateur électrique pour un profil de charge spécifique. Des études à portées globales ont déjà été menées dans une optique similaire, mais s'intéressant aux coûts économiques et non énergétiques [6] nous étendons ici ces calculs à des critères d'énergie globale sur cycle de vie.

Le modèle du transformateur

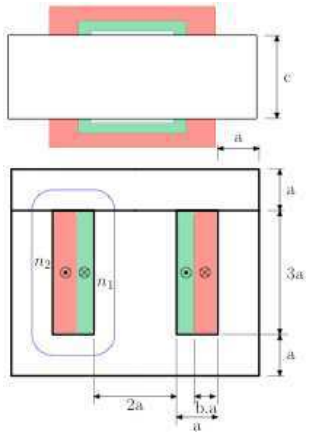


Fig. 3. Paramètres géométriques du transformateur [7].

Avant de se lancer dans des calculs complexes sur des modèles complets de chaînes d'entraînement électromécaniques, nous avons décidé de valider le principe de la méthode et de poser les bases de la démarche d'éco-conception sur le cas relativement simple d'un transformateur monophasé alimenté sous tension et fréquence fixes. Celui-ci peut alors être décrit [7] par seulement trois paramètres géométriques (**a**, **b** et **c**), et le nombre de spires (**n_1**) tels qu'illustré par la Fig. 3.

a) Premier objectif : la masse active

Il s'agit de la somme des masses des parties actives du transformateur.

$$M_a = M_{cuivre} + M_{fer} \tag{1}$$

Ce calcul nécessite la connaissance de la densité **m_v** des différents matériaux mis à contributions, ainsi que des données géométriques du transformateur et du coefficient de remplissage du cuivre **k_r**.

$$M_{cuivre} = \left(S_{b1}.L_{b1} + S_{b2}.L_{b2}\right)k_r.m_{v_{cuivre}} \tag{2}$$

$$M_{fer} = V_{fer}.m_{v_{fer}} \tag{3}$$

Où **S_b** est la section du bobinage (primaire ou secondaire) et **L_b** sa longueur moyenne. **V_{fer}** est le volume de fer.

$$\begin{cases} S_{b1} = 3b.a^2 ; L_{b1} = 2c + a(4 + \pi b) \\ S_{b2} = 3(1-b).a^2 ; L_{w2} = 2c + a(4 + \pi(1+b)) \\ V_{fer} = 24c.a^2 \end{cases} \tag{4}$$

b) Second objectif : énergie globale sur cycle de vie

Le second objectif concerne l'énergie globale **E_{glob}**. Celle-ci est définie comme la somme de l'énergie liée à la transformation des matières premières (elle est proportionnelle à la masse des matériaux utilisés) **E_{mat}** et de l'énergie dissipée (pertes) lors de la vie du transformateur (qui dépendra du profil de charge) **E_{pertes}**. De même que la matière des parties inactives, les coûts énergétiques d'assemblage et de déconstruction ne sont pas pris en compte dans **E_{mat}** car il serait nécessaire de rentrer dans les détails technologiques et logistiques des fabricants, données encore insuffisamment formalisées actuellement. Dans le cas particulier de production en grande série, on peut raisonnablement supposer que le coût énergétique de fabrication et de déconstruction reste faible devant celui d'investissement dans les matières premières. Dans le cadre de ces hypothèses restrictives, on peut écrire :

$$E_{ACV} = E_{mat} + E_{pertes} \tag{5}$$

Avec:

$$\begin{cases} E_{mat} = \sum_{étapes}\left(\sum_{éléments} M_{élément}.Em_{étape_{élément}}\right) \\ E_{pertes} = \left(P_{pertes_{fer}} + P_{pertes_{cuivre}}\right)T_{use} \end{cases} \tag{6}$$

$$\begin{cases} P_{pertes_{cuivre}} = \dfrac{\rho_{cuivre}}{k_r}.\left(\dfrac{L_{b1}}{S_{b1}}(n_1.I_1)^2 + \dfrac{L_{b2}}{S_{b2}}(n_2.I_2)^2\right) \\ P_{pertes_{fer}} = V_{fer}.\left(k_h.f.(2.B_m)^2 + \alpha_p.\left(\dfrac{2\pi f.B_m}{\sqrt{2}}\right)^2\right) \end{cases} \tag{7}$$

$\mathbf{k_h}$ et $\boldsymbol{\alpha_p}$ sont les coefficients des pertes par hystérésis et par courants de Foucault, $\boldsymbol{\rho_{cuivre}}$ est la résistivité du cuivre.

c) Contraintes :

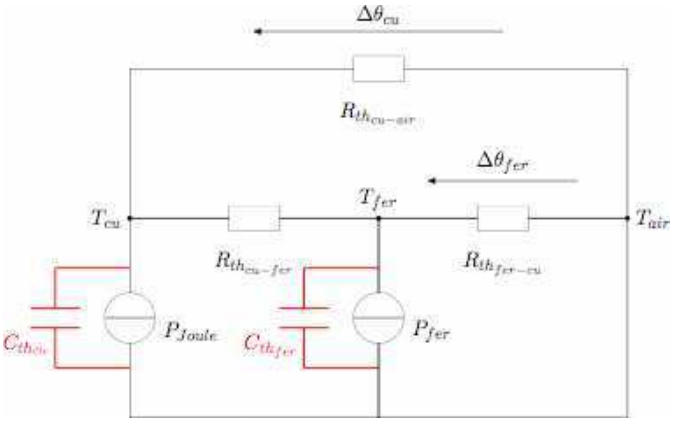


Fig. 4. Schéma équivalent électrique du modèle thermique du transformateur. Les capacités thermiques sont rajoutées dans le modèle thermique transitoire.

La première contrainte concerne l'induction magnétique dans la branche centrale du transformateur qui doit rester inférieur à une valeur un peu arbitraire : $\mathbf{B_{max}}$=1,5T afin de limiter les effets de la saturation, notre modèle étant linéaire.

$$\left[B = \frac{\sqrt{2}U_1}{2ac.(2\pi f)n_1} \right] \leq B_{\max} \qquad (8)$$

$\mathbf{U_1}$ est la valeur efficace de la tension primaire. La seconde contrainte est thermique, les différences de température entre fer et air ou cuivre et air sont limitées à $\Delta\theta_{max} = 100°C$.

Ces contraintes thermiques sont calculées à partir du schéma proposé Fig. 4.

$$\begin{cases} \Delta\theta_{fer} \leq \Delta\theta_{\max} \\ \Delta\theta_{cuivre} \leq \Delta\theta_{\max} \end{cases} \qquad (9)$$

2. Profils de charge

Les simulations menées avec l'algorithme NSGA-II sont fondées sur différents profils de charges. Dans ce papier, les profils sont définis à l'échelle de la journée, puis répétés artificiellement cinq fois par semaine et dix mois par ans pendant quinze ans. Notons que nos simulations sont basées sur un temps de vie maximal théorique et de valeur arbitraire (15 ans). Nous ne prenons en compte ni le vieillissement des composants, ni l'éventualité d'un remplacement avant la fin de vie.

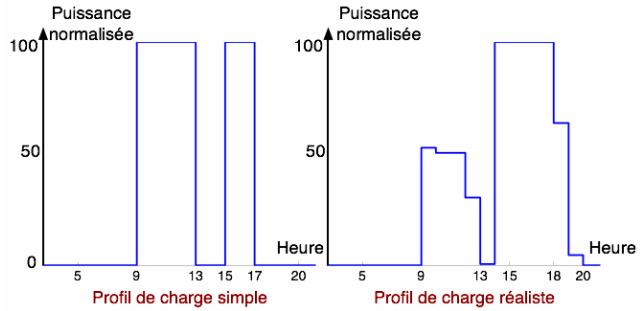


Fig. 5. Exemples de profils de charges (répétés selon des cycles définis dans le texte).

A travers ces profils, nous jouons sur la largeur des sollicitations, ainsi que sur leurs amplitudes au cours d'une journée. Ceci nous permet de mettre en lumière plusieurs points concernant une méthodologie d'éco-conception. D'une part, l'intérêt d'utiliser un modèle incluant une réponse thermique transitoire (la perte en temps de calcul se justifie-t-elle par des résultats d'optimisation plus réalistes ?). D'autre part, l'impact de l'analyse de cycle de vie du transformateur sur les fronts de Pareto.

En effet, la contribution des coûts énergétiques de fabrication, recyclage, etc. ne dépendent que de la masse. Par contre, la contribution des pertes de fonctionnement dépend, elle, du temps de sollicitation. Par exemple, un produit utilisé 24 heures sur 24 verra ses pertes de fonctionnement devenir nettement prépondérantes devant les autres coûts énergétiques.

Notons que lorsque le transformateur n'est pas sollicité par la charge, il reste connecté à sa source de tension, provoquant ainsi des pertes fer au sein du circuit magnétique. D'autre part, nous ne prendrons pas en compte la variation en température des coefficients et de l'ensemble des objectifs et contraintes.

III.Résultats

A. Premières simulations

1. Contribution de E_{mat}

Nos premières simulations (Fig. 6) concernent la comparaison de deux optimisations opposant masse et énergie. La première porte sur l'énergie globale sur cycle de vie, et la seconde sur les seules pertes de fonctionnement. Toutes les premières simulations ont été effectuées avec un modèle thermique du type « régime permanent ».

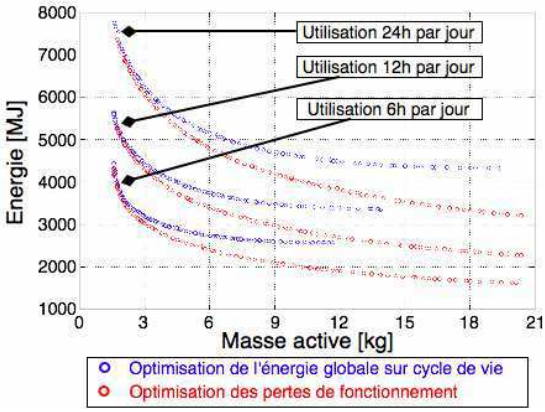


Fig. 6. Transformateur de 230VA. Comparaison de résultats d'optimisation.

Avec chaque profil de charge utilisé apparaît une divergence entre les deux fronts de Pareto.
En effet, il n'est pas possible d'atteindre des solutions technologiques d'aussi forte masse en optimisation sur l'énergie globale qu'en optimisation sur les pertes de fonctionnement. Ceci s'explique par le fait que dans la première optimisation, l'augmentation de la masse à un coût énergétique direct. L'algorithme génétique élimine donc naturellement les solutions de trop forte masse, car elles possèdent aussi une forte énergie globale sur cycle de vie. Ce mécanisme est tout à fait nouveau par rapport aux optimisations sur pertes de fonctionnement.
La différence entre les niveaux d'énergie des deux optimisations sur profil de charge identique vient aussi des coûts énergétiques élémentaires.
En effet, l'écart se creuse avec l'augmentation de la masse de la solution technologique. Les solutions les plus légères tendent à être identiques dans les deux optimisation car la contribution de $\mathbf{E_{mat}}$ dans $\mathbf{E_{glob}}$ devient négligeable.

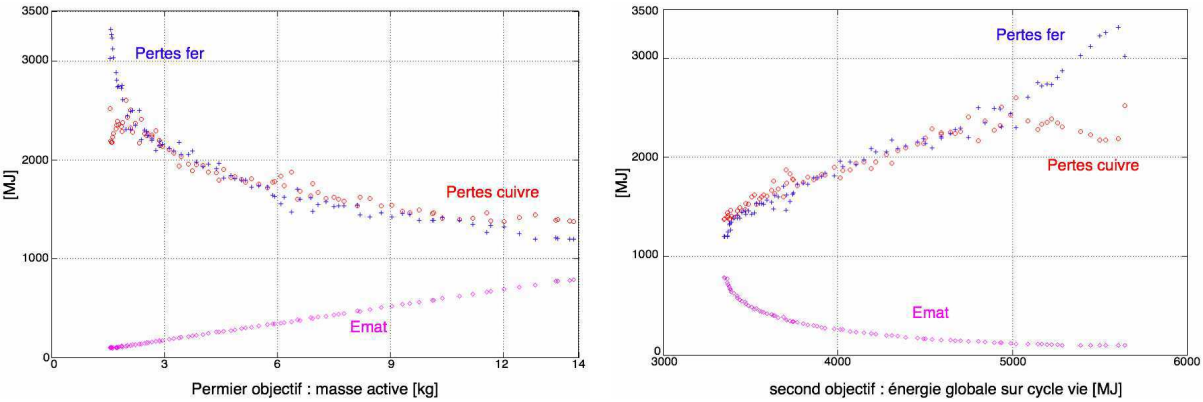


Fig. 7. Répartition des énergies dans $\mathbf{E_{LCA}}$ en fonction des deux objectifs sur un profil de charge 12 heures par jour.

Pour illustrer ceci, nous avons représenté Fig. 7, dans le cas d'un transformateur utilisé 12 heures par jour, la répartition des différentes contributions énergétiques en fonction des deux objectifs à minimiser. Il y a clairement un conflit entre $\mathbf{E_{mat}}$ et $\mathbf{E_{pertes}}$, qui confirme les remarques du paragraphe précédent.
La différence entre pertes fer et pertes cuivre pour une énergie globale sur cycle de vie supérieure à 5000MJ vient de la butée en contrainte thermique qui limite le courant maximal (et donc les pertes cuivre) dans le bobinage. Tout comme la contrainte en température, la contrainte en induction est atteinte pour les structures de plus faible masse et de plus forte énergie.

2. Importance du profil de charge

La comparaison des trois différents temps d'utilisation du transformateur à la Fig. 6 nous amène un autre commentaire. L'équation (6) montre que $\mathbf{E_{pertes}}$ croît directement avec le temps d'utilisation alors que $\mathbf{E_{mat}}$ ne dépend que des paramètres géométriques. La Fig. 8 nous donne une idée de la contribution de $\mathbf{E_{mat}}$ et $\mathbf{E_{pertes}}$ dans $\mathbf{E_{ACV}}$ en fonction du temps total de sollicitation dans le cas d'une structure donnée de transformateur.
Les résultats d'optimisation peuvent proposer des solutions technologiques de plus forte masse quand le temps d'utilisation croit car la proportion de $\mathbf{E_{mat}}$ dans $\mathbf{E_{ACV}}$ décroît. Par contre, l'analyse de cycle de vie peut devenir d'un intérêt tout à fait secondaire dans ces cas d'optimisation où $\mathbf{E_{pertes}}$ devient prépondérante.

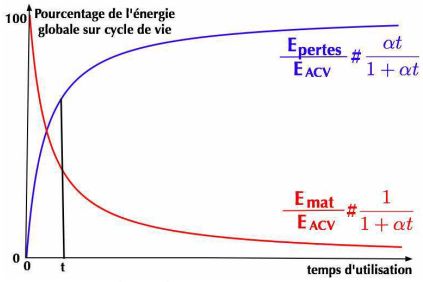


Fig. 8. Contributions énergétiques dans $\mathbf{E_{LCA}}$ en fonction du temps d'utilisation. ($\alpha = \mathbf{P_{pertes}}/\mathbf{E_{mat}}$)

En première conclusion, l'ACV a un impact sur les résultats d'optimisation qui dépendent des coûts énergétiques élémentaires ainsi que du profil de charge. C'est pourquoi, comme toutes les études impliquant des études cycliques ou temporelles, les méthodes d'éco-conception tendent à être très spécifiques au cas auquel elles sont appliquées.
La pertinence de telles études par rapport aux optimisations plus classiques dépend grandement des différentes contributions énergétiques.

3. Modèle thermique transitoire

Lors des simulations, nous utilisons différents types de profils de charge, sollicitant plus ou moins longtemps le transformateur. Nous avons vu précédemment que les études d'ACV se justifiaient particulièrement dans le cadre de sollicitations brèves et espacées dans le temps (un exemple typique pour les machines électriques serait un moteur de volet roulant) avec des durées de fonctionnement la plupart du temps proches des constantes de temps thermiques du système électromagnétique considéré. La prise en compte d'un modèle transitoire thermique est donc nécessaire pour une optimisation qui se veut un tant soit peu réaliste.

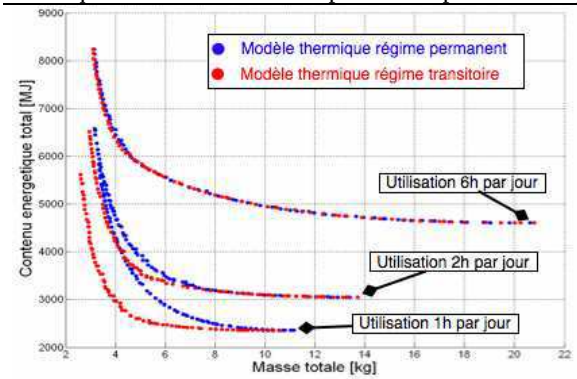


Fig. 9. Optimisation avec ou sans modèle thermique transitoire. Transformateur de 500VA

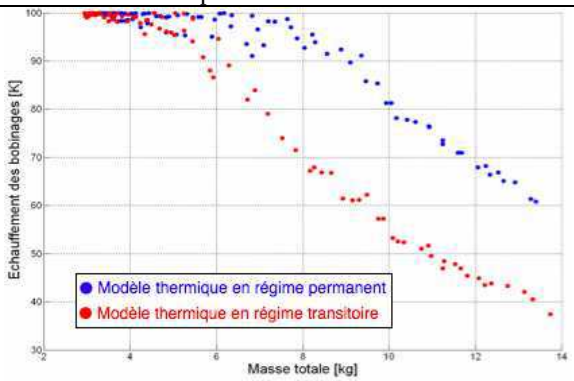


Fig. 10. Echauffement transformateur de 500VA, utilisation 2h par jour

Nous observons sur la disposition des fronts de Pareto (Fig. 9) que l'écart entre deux optimisations qui diffèrent uniquement par le modèle thermique est d'autant plus marqué que le temps de sollicitation du transformateur est faible. En effet, dans ce cas le transformateur n'a pas le temps d'atteindre son régime thermique permanent et l'utilisation du modèle thermique transitoire permet d'éviter un surdimensionnement des structures.

Ceci se vérifie sur les échauffements maximaux atteints par les structures de transformateurs obtenues par optimisation sur un profil de charge de deux heures par jour (Fig. 10). Sans utiliser de modèle thermique transitoire, les températures sont systématiquement supérieures, atteignant plus rapidement la butée thermique plus particulièrement pour les faibles masses. L'écart entre les échauffements obtenus avec les deux modèles thermiques augmente logiquement avec la masse de la solution considérée, en revanche la différence sur le front de Pareto se trouve pour les solutions à forte énergie globale et faible masse. Ceci est dû au fait que la butée en température est atteinte plus tôt sans régime thermique transitoire, empêchant l'algorithme d'optimisation d'aplatir le front de Pareto vers des masses plus faibles.

L'écart entre les courbes dépend notamment de la puissance nominale choisie pour le transformateur, mais il souligne globalement que lors des calculs sur faibles temps de fonctionnement, (où l'ACV apporte des structures de transformateur différentes de celles obtenus avec des optimisations classiques) il faut inclure un modèle thermique transitoire, quitte à multiplier le temps de calcul (par plus de dix dans notre cas).

B. Etude de sensibilité

Les coûts énergétiques élémentaires des bases de données d'ACV dépendent de conditions locales et technologiques. Pour cette raison, les données utilisées dans les optimisations ne sont considérées que comme des ordres de grandeur, dont nous proposons les valeurs dans la Table I [8]. De plus, nous travaillons sur des optimisations incluant des projections sur 15 ans. Il est donc nécessaire de connaître dans quelles mesures sont sensibles les résultats des optimisations aux différents coûts énergétiques élémentaire. Les équations (5) et (6) nous donnent l'expression globale de la sensibilité:

TABLE I
Coûts énergetiques élementaires

PARAMETRES	Valeurs
Extraction et traitement du cuivre	107.7 MJ/kg
Extraction et traitement du fer	35.7 MJ/kg
Extraction et traitement de l'aluminium	188.7 MJ/kg
Recyclage du cuivre	0.01 MJ/kg
Recyclage du fer	0.01 MJ/kg
Recyclage de l'aluminium	0.01 MJ/kg
Transport	5140 MJ/kg/Km

$$\Delta E_{glob} = \sum_{étapes} \left(\sum_{éléments} M_{élément} . \Delta Em_{étape_{élément}} \right) \quad (10)$$

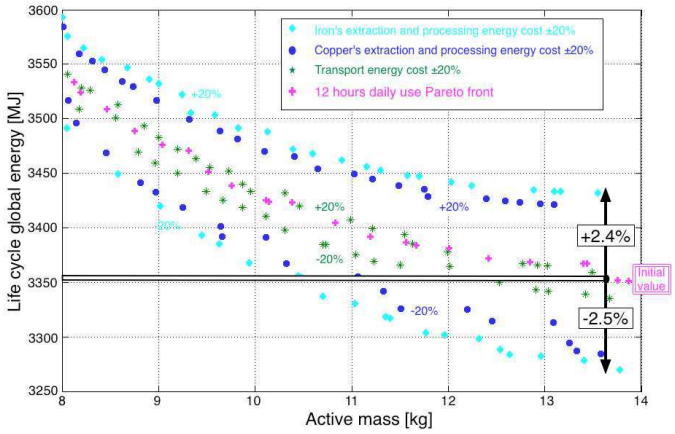


Fig. 11. Etude de sensibilité. Variation des coûts énergétiques élémentaires.

Sur la Fig. 11, nous présentons différents fronts de Pareto obtenus par variation de ±20% des coûts énergétiques d'extraction et de recyclage du fer et du cuivre, ainsi que du coût de transport. Toutes les simulations sont fondées sur un profil de charge qui utilise le transformateur à puissance nominale pendant 12 heures par jour, changeant un seul des coûts énergétiques élémentaires de ±20% de sa valeur initiale.

La variation maximale de $\mathbf{E_{ACV}}$ est de moins de 5% dans le pire des cas et cette variation décroît avec la proportion de $\mathbf{E_{mat}}$ dans $\mathbf{E_{ACV}}$ (c'est-à-dire. avec les solutions technologiques les plus légères).

La sensibilité des résultats n'est pas la même pour tous les coûts énergétiques élémentaires. En effet, dans notre cas, l'extraction des matériaux à plus d'impact sur $\mathbf{E_{ACV}}$ que le transport des matériaux. Il est donc plus important de concentrer nos optimisations sur ces coûts dans ce cas-ci.

Cette étude nous permet en outre de mettre en valeur les coûts qui peuvent être négligés dans la suite des optimisations. Ceux-ci doivent bien sûr être toujours strictement définis, et représentent un autre point où la méthodologie d'éco-conception dépend grandement du sujet d'étude.

TABLE II
Paramètres pour un transformateur de 13kg

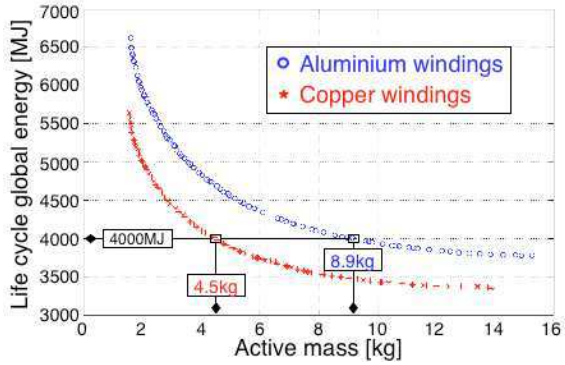
Paramètres	Extraction et traitement du cuivre +20% [a]	Extraction et traitement du cuivre -20% [a]
a	28.5mm	28.0mm
b	43.2%	43.7%
c	68.3mm	70.8mm
$\boldsymbol{n_1}$	614 spires de bobinage	593 spires de bobinage

A titre d'exemple, nous proposons dans la Table II les valeurs des paramètres pour les deux cas extrêmes d'optimisation sur une structure de transformateur de 13 kg retenue sur les fronts de Pareto de la Fig. 11.

La dispersion des paramètres n'est pas significative dans ce cas. Nous devons toutefois rester conscient de la dépendance de la sensibilité des résultats d'optimisation à la masse des matériaux ainsi qu'au profil de charge. En effet, lorsque le temps de sollicitation du transformateur décroît, la proportion de $\mathbf{E_{mat}}$ dans $\mathbf{E_{ACV}}$ croît. Les résultats d'optimisation sont donc plus sensibles aux variations des coûts énergétiques élémentaires. Par exemple, avec des simulations identiques à celles proposées Fig. 11, un profil de charge sollicitant le transformateur six heures par jour donne un maximum de variation pour $\mathbf{E_{ACV}}$ de 5.5% et celui de 24 heures est en dessous de 4.5%.

C. Influence du matériau de bobinage

L'éco-conception amène à de nouvelles solutions technologiques ainsi qu'à de nouvelles structures incluant différentes compositions de matières premières. Changer le cuivre en aluminium ou les tôles de fer en poudre selon des critères d'optimisation est un exemple de ce que devrait proposer automatiquement une méthode d'éco-conception des convertisseurs électromagnétiques.



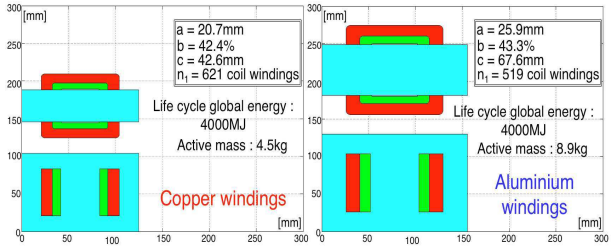


Fig. 12. Comparaison des optimisation sur un même profil de charge de deux matériaux de bobinage différents (ci-dessus) et exemple de solutions à E_{LCA} identiques (ci-contre).

Sur un profil de charge simple (12 heures de sollicitation par jour), les résultats d'optimisation sont assez différents suivant que les bobinages sont en cuivre ou en aluminium.

Lorsque nous choisissons par exemple un objectif d'énergie globale sur cycle de vie ne dépassant pas 4000MJ, nous obtenons une solution technologique avec des bobinages en aluminium deux fois plus lourds que dans le cas de bobinages en cuivre. Ceci affecte aussi les dimensions des solutions de manière prononcée (Fig. 12).

D'un autre côté, le choix d'un objectif de minimisation de masse (par exemple une structure de transformateur ne dépassant pas 4kg) affecte l'énergie globale sur cycle de vie (4800MJ avec des bobinages en aluminium et

4100MJ avec des bobinages en cuivre) et a priori beaucoup moins les dimensions (non représentées sur la Fig. 12).
Selon l'objectif fixé, les résultats des solutions optimales de transformateur proposées sur les fronts de Pareto peuvent se montrer très sensibles au changement de matériau de bobinage. Le choix de l'objectif ainsi que les spécifications du profil de charge ont un grand impact sur les résultats des optimisations dans nos simulations, d'autant plus que l'éco-conception s'appuie sur des prédictions s'étalant sur un cycle de vie entier.

IV. Conclusion et perspectives

Le résultat principal de cette étude est que l'analyse sur cycle de vie est à même de proposer des dimensionnements différents des optimisations plus classiques, mais que cet impact réel sur les résultats d'optimisation dépend très fortement des conditions d'utilisation du produit, dans notre cas le profil de charge.
La méthodologie d'éco-conception choisie doit donc être directement liée au profil de charge, spécialement au fait que quelques coûts énergétiques élémentaires puissent être négligeables dans la résultante d'énergie globale sur cycle de vie. En outre, dans certains cas il faut utiliser une modélisation thermique transitoire, qui augmente grandement les temps de calcul, mais permet d'avoir une simulation plus proche de la réalité. Dans le cas contraire, il suffit d'empiler des séquences de régimes permanents, permettant un calcul très rapide, et qui peut rester valable dans le cas de profils de charge simples.
La seconde partie de notre étude concerne la sensibilité des résultats d'optimisation aux coûts énergétiques élémentaires. Ce point, fondamental au regard de la précision et de l'origine des bases de données d'ACV, nous amène, dans le cadre restrictif de nos simulations, à une faible sensibilité des résultats aux variations des coûts énergétiques élémentaires. Il est à noter que cette sensibilité est variable suivant le profil de charge choisi, ainsi que suivant l'importance des coûts élémentaires énergétiques dans l'énergie globale sur cycle de vie. D'un autre côté, un simple changement de matériau de bobinage entraîne des différences suffisamment importantes dans les résultats d'optimisation pour laisser penser qu'une méthode d'éco-conception ait à prendre cette possibilité en compte. Toutefois, ces changements vont dépendre de besoins spécifiques en matériaux ou d'autres objectifs.
Le cas du transformateur électrique monophasé est un premier pas dans une progression qui nous mènera à une méthodologie d'éco-conception pour les convertisseurs électromagnétiques. Nous allons naturellement nous tourner vers les machines électriques en multipliant les paramètres, les matériaux et le nombre de contraintes. Notamment, nous comptons prendre en compte les parties « inactives » dans le calcul de la masse, ainsi que les coûts énergétiques des processus de fabrication et de démontage des systèmes électromagnétiques. Cette méthode d'éco-conception inclura également l'alimentation électrique des machine, nécessaire dans le cadre d'une optimisation globale de machine électrique.

V. Annexes

TABLE I
Paramètres d'optimisation

Paramètres	Valeurs minimales	Valeurs maximales
a	5mm	30mm
b	0.001%	100%
c	5mm	100mm
n_1	1 spire de bobinage	10000 spires de bobinage

TABLE II
Données de calculs des objectifs

Paramètres	Description	valeurs
U_1	Tension au primaire du transformateur	230V
U_2	Tension au secondaire du transformateur	9V
S	Puissance apparente au primaire	230VA
f	Fréquence	50Hz
e_{iso}	Epaisseur de l'isolant autour des bobinages	1mm
λ_{iso}	Conductivité thermique de l'isolant	$0{,}29 W.m^{-1}.K^{-1}$
h	Coefficient de convection thermique	$7 W.m^{-2}.K^{-1}$
$\Delta\theta_{MAX}$	Variation de température maximale admissible par les matériaux	100K
$C_{THaluminium}$	Capacité thermique massique de l'aluminium à 100°C	$904 J.kg^{-1}.K^{-1}$
$C_{THthcuivre}$	Capacité thermique massique du cuivre à 100°C	$385 J.kg^{-1}.K^{-1}$
C_{THfer}	Capacité thermique massique du fer à 100°C	$460 J.kg^{-1}.K^{-1}$
B_{max}	Induction maximale	1,5T
$m_{Valuminium}$	Masse volumique de l'aluminium	$2702 kg.m^3$
$m_{Vcuivre}$	Masse volumique du cuivre	$8860 kg.m^3$
m_{Vfer}	Masse volumique du fer	$7600 kg.m^3$
k_h	Coefficient de pertes par hysteresis	$90 A.m V^{-1}.s^{-1}$
α_p	Coefficient de pertes par courant de Foucault	$0{,}065 A.m.V^{-1}$
$\rho_{aluminium}$	Résistivité de l'aluminium	1,7e-8 Ω.m
ρ_{cuivre}	Résistivité du cuivre	1,7e-8Ω.m
k_r	Coefficient de remplissage du bobinage	0,4

VI. Bibliographie

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

[2] ISO 14040:2006 Système de management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes généraux, 2006.

[3] H. A. Udo de Haes, M. van Rooijen, "Life Cycle Approaches – The road from analysis to practice". UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2005.

[4] K. Deb, Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. Wiley, 2001.

[5] 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.

[6] 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.

[7] C. Espanet, J. Bigeon, "Utilisation de l'optimisation pour rénover l'enseignement de la conception des machines électriques – Description d'un travail pratique utilisant Pro@Design", Faculté des Sciences Louis Néel, UFR-STGI, Université de Franche-Comté, 2005.

[8] Industrial Ecology – Life Cycle Systems Group of the EPFL-GECOS (Ecosystem Management Laboratory). Energy and CO_2 database. http://gecos.epfl.ch/lcsystems/