



HAL
open science

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

Bernard Multon, Hamid Ben Ahmed, Vincent Debusschere, Julien Seigneurbieux, Marie Ruellan, Yaël Thiaux

► **To cite this version:**

Bernard Multon, Hamid Ben Ahmed, Vincent Debusschere, Julien Seigneurbieux, Marie Ruellan, et al.. Eco-conception: de nouveaux critères de conception en électrotechnique pour le développement durable. La Revue de l'électricité et de l'électronique, 2008, 2008, pp.37-45. hal-03299513

HAL Id: hal-03299513

<https://hal.science/hal-03299513>

Submitted on 11 Jul 2023

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.

Eco-conception : de nouveaux critères de conception en électrotechnique pour le développement durable **(Ecodesign : New Design Criteria in Electrical Engineering for Sustainable Development)**

B. MULTON, H. BEN AHMED, V. DEBUSSCHERE, J. SEIGNEURBIEUX, M. RUELLAN, Y. THIAUX
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 deux exemples qui font l'objet de travaux de recherche : d'une part des transformateurs électromagnétiques et d'autre part, des systèmes de production photovoltaïque autonomes (incluant un accumulateur). Ces deux exemples permettent de mettre en évidence la problématique générale de l'éco-conception.

Mots clés :

Eco-conception, génie électrique, analyse sur cycle de vie (ACV), transformateur électromagnétique, systèmes photovoltaïques, optimisation de dimensionnement.

Abstract

Power electric systems (production, transportation, consumption) are contributing massively to environmental perturbation of humanity. They need energetically costly raw materials, and despite their high efficiency, they have energy losses. First, the authors make a quick point about the environmental impact of electrical activities, then they highlight some of the effects of the limits of raw material resources. Next they clarify the concepts of life cycle assessment and eco-design, which can help to minimize the environmental impacts of the concerned devices. Eco-design is to optimize the design of components or systems, or service, in order to minimize their environmental impacts, so optimizations are multicriteria. In the context of electrical systems, the criterion of energy requirement overall life cycle is held. The authors present two examples which are the subject of research : electromagnetic transformers and autonomous photovoltaic systems (with energy storage). These two examples highlight the broader issue of eco-design.

Keywords :

Ecodesign, electrical engineering, life cycle assessment (LCA), electromagnetic transformer, photovoltaic systems, sizing optimisation.

1- L'impact environnemental des systèmes électriques

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 dernier 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.

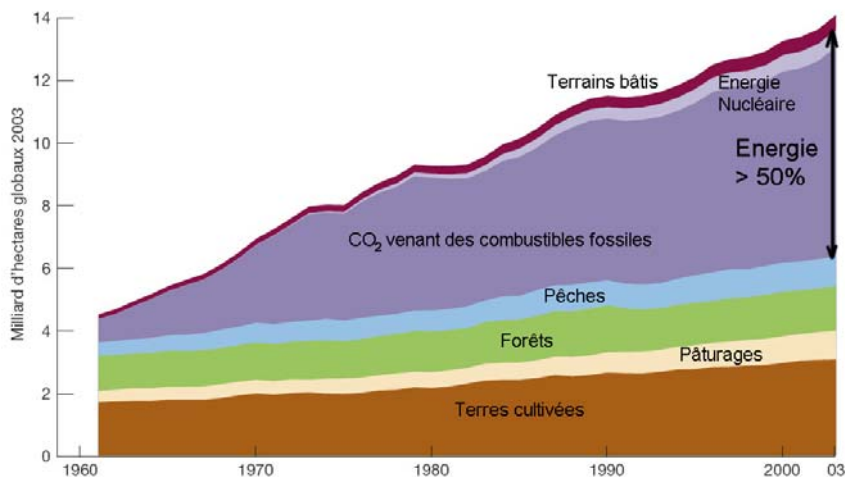


Figure 1 : Empreinte écologique, part des activités énergétiques [WWF_06]

La consommation mondiale d'énergie primaire [IEA_07] a augmenté à un rythme élevé et croissant (3,7% entre 2004 et 2005, et 3,3% par an en moyenne depuis 2001). Dans ce contexte, la production d'électricité augmente à un rythme encore plus soutenu : 4,5% entre 2004 et 2005 et 4,2% par an depuis 2001. 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 18 235 TWh électriques produits dans le monde en 2005, il a fallu environ 41 000 TWh primaires soit 31% des 133 000 TWh (ou 11,4 Gtep) d'énergie primaire commerciale globalement convertie cette même année. Et, compte tenu des pertes de transport et de distribution, sur ces 18 235 TWh, seulement 14 900 ont été « vendus » aux consommateurs.

Ainsi l'électricité finale, qui représente 16,3% de l'ensemble des produits énergétiques finaux, ne compte que pour 11% 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 près de 82% 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.

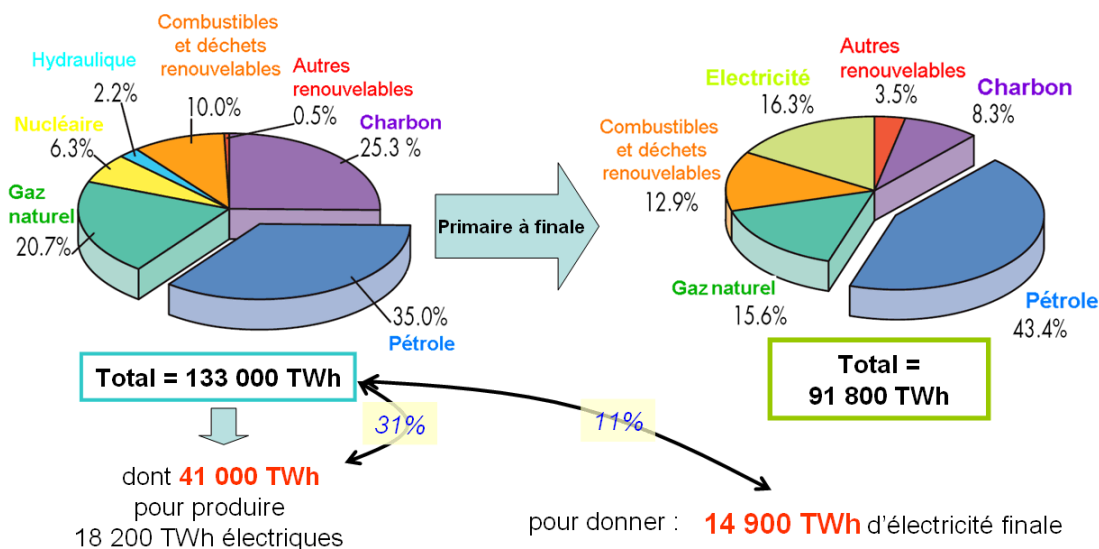


Figure 2 : Répartition des ressources consommées, au niveau mondial, en énergie primaire et finale et place de l'électricité en 2005, à partir des données de [IAE_07].

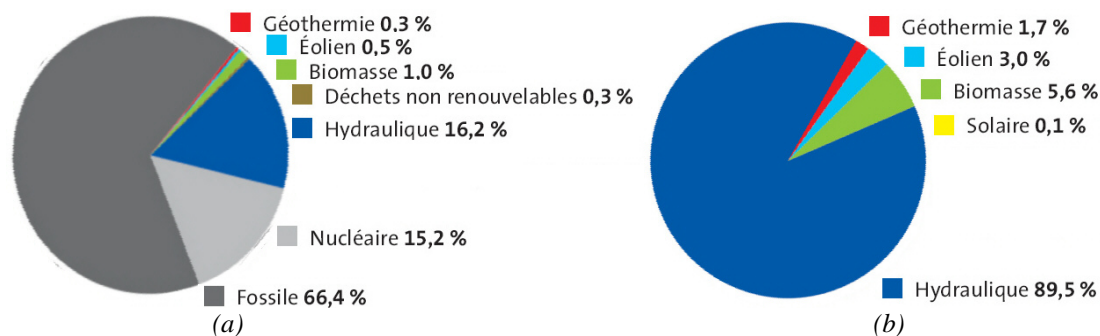


Figure 3 : Répartition de la production d'électricité mondiale par sources primaires en 2005, totale (a) et d'origine renouvelable (b) [Observ'ER_06]

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.

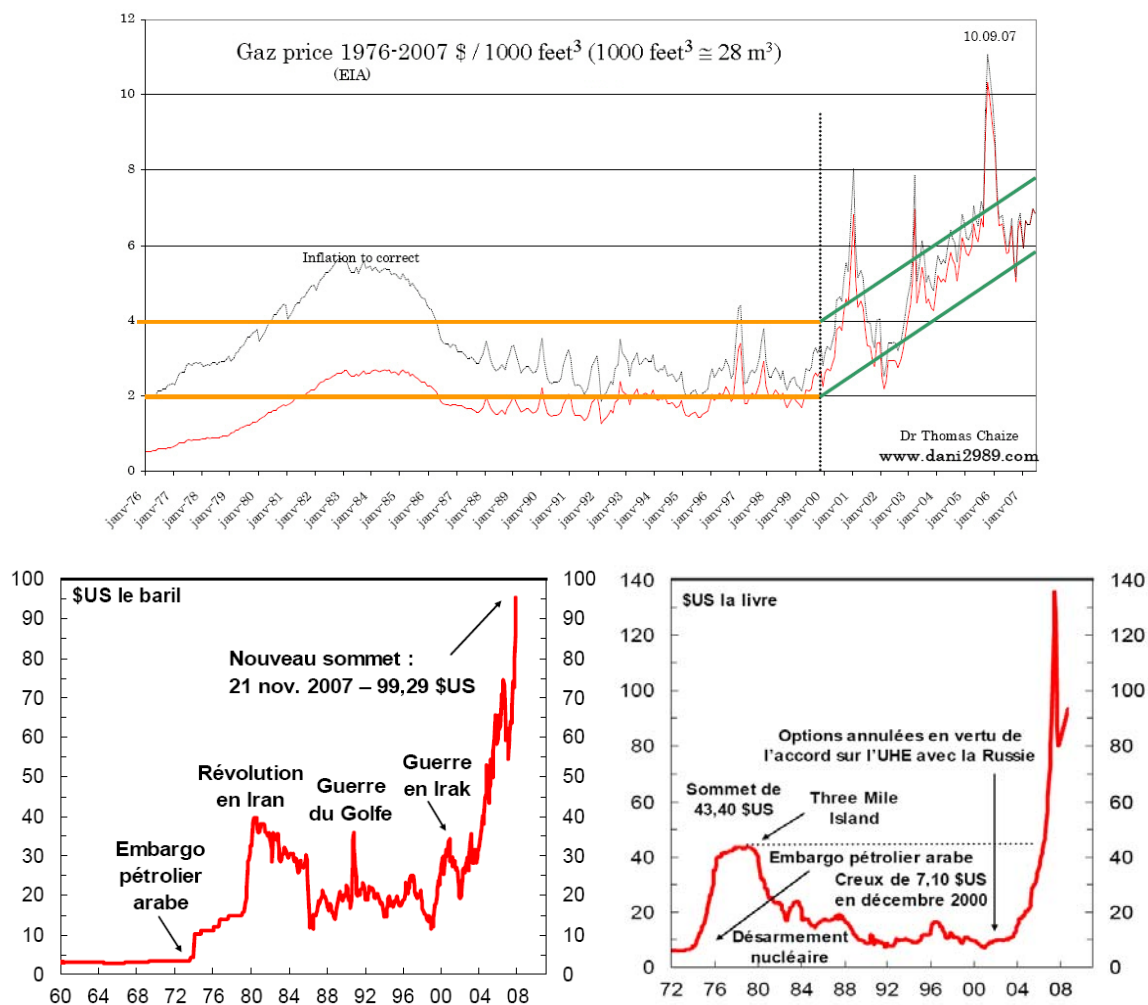
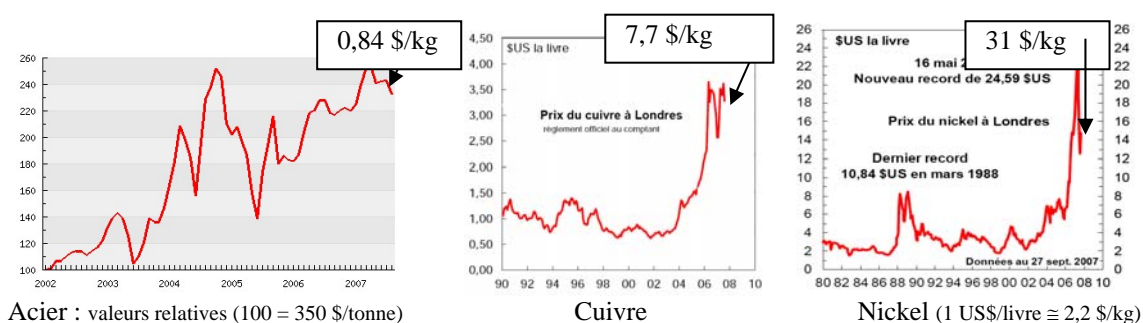


Figure 4 : Evolution des prix des matières premières énergétiques : gaz [CHA_07], pétrole et uranium [SCOT_07]

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, 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 qu'environ 10% 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.



Acier : valeurs relatives (100 = 350 \$/tonne)

Cuivre

Nickel (1 US\$/livre \cong 2,2 \$/kg)

Figure 5 : Evolution des prix de quelques matières premières utilisées dans la construction de systèmes énergétiques : acier, cuivre et nickel [SCOT_07]

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 6000 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 [ISO_06] 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 les dits 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 « Contenu Énergétique » (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 CO₂ (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.

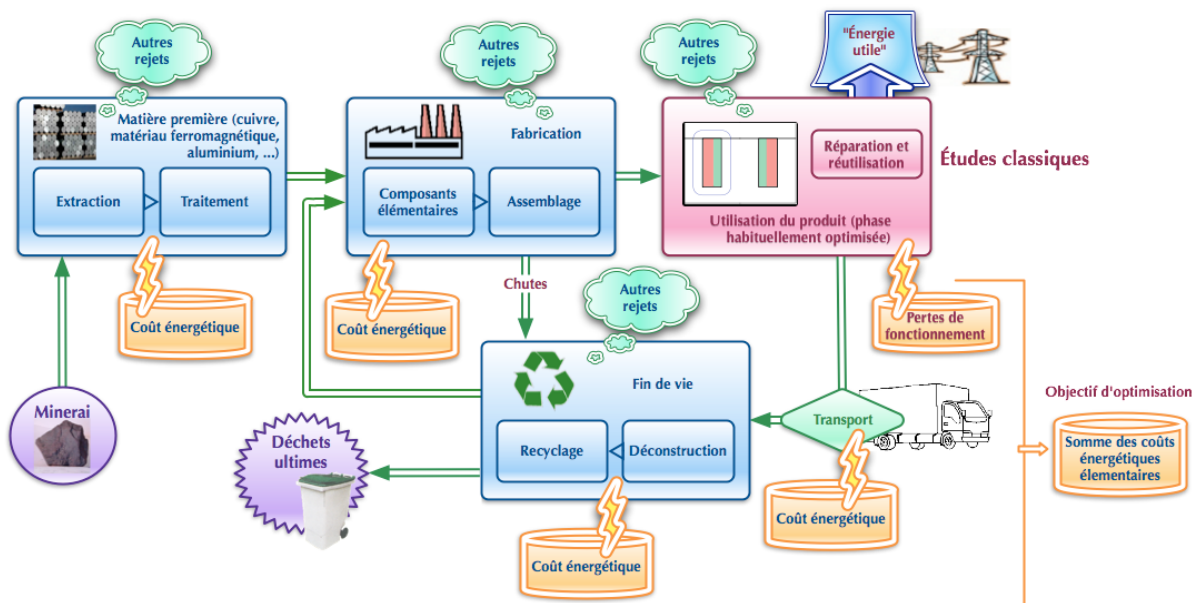


Figure 6 : Schéma représentatif de l'évaluation du « contenu énergétique » sur le cycle de vie d'un produit électrique consommateur d'énergie.

Plusieurs logiciels permettant l'évaluation des impacts environnementaux sur cycle de vie existent, par exemple SIMAPRO et EIME. 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 issues de sources variées et met en évidence des dispersions importantes sur leurs valeurs. 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.

Matériaux/Source	Joliet [JOL_Web] <i>Energie primaire non renouvelable (Suisse)</i>	Schleisner [SCH_00] <i>Energie primaire totale (données danoises)</i>	Gutowski [GUT_04] <i>Typical Energy Requirements (USA)</i>
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 premières.

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 16% de l'électricité mondiale.

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-conception avec critère énergétique sur cycle de vie

Dans ce chapitre, nous présentons brièvement deux exemples d'optimisation de dimensionnement de dispositifs électriques illustrant des problématiques très différentes. Dans les deux cas, l'un des critères d'optimisation est le contenu énergétique ou énergie globale consommée sur cycle de vie. Ces deux exemples concernent d'une part un transformateur dans le cas le plus simple d'une alimentation sous tension et fréquence fixes et d'autre part un système de production photovoltaïque avec stockage électrochimique en site isolé.

Exemple 1 : Transformateur sous tension et fréquence fixes [DEB_07]

L'utilisation de l'outil d'analyse sur cycle de vie se pratique ici dans le cadre d'une optimisation du dimensionnement d'un composant électromagnétique : un transformateur. Nous considérons, dans cet exemple, deux objectifs à minimiser :

- l'énergie 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 transformateur 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 transformateur 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 le rendement de production de l'électricité pour prendre en compte l'énergie primaire correspondante. Le calcul de la masse des parties actives se fait à partir des masses volumiques et des volumes des différents matériaux mis en jeu dans la construction du transformateur. Dans notre cas, du fer cuivre ou fer aluminium.

Nous lançons une optimisation des dimensions par l'intermédiaire d'un algorithme génétique nommé NSGA_II [DEB_01, REG_03] qui va chercher à répartir un ensemble de solutions suivant un front de Pareto, minimisant ainsi au mieux les deux objectifs contradictoires. Cette optimisation se base sur un profil de charge défini à la journée puis répété artificiellement chaque jour pendant quinze ans avec des interruptions de deux jours par semaine et de deux mois par an. Le profil d'une journée consiste dans notre cas en une utilisation du transformateur à puissance nominale pendant un nombre d'heures choisi, réparties de manière identique entre le matin et l'après-midi avec une interruption de deux heures à midi. Ce type de profil peut présenter des utilisations du transformateur très brèves qui ont justifié la prise en compte des aspects thermiques transitoires (forte augmentation du temps de calcul par rapport à une superposition de régimes permanents). En effet, la modélisation thermique est nécessaire dans le calcul de la principale contrainte imposée à notre logiciel d'optimisation, à savoir la température maximale des matériaux. La seconde contrainte concerne la saturation du champ magnétique dans le circuit magnétique, tous nos modèles étant linéaires.

La figure 7 montre les paramètres dimensionnels à optimiser ainsi qu'un résultat particulier d'optimisation sous forme de fronts de Pareto. L'optimisation « classique » correspond à la seule minimisation des pertes en fonctionnement. Notons que les deux fronts présentés sur cette figure tendent à se confondre lorsque l'objectif de masse est privilégié. En effet, la différence entre les pertes de fonctionnement et le reste des contributions à l'énergie globale sur cycle de vie est que celui-ci dépend directement de la masse des parties actives. Minimiser la masse revient donc à faire tendre l'énergie globale sur cycle de vie vers la somme des pertes de fonctionnement sur la durée réelle d'utilisation du transformateur, diminuant ainsi la différence entre les deux optimisations. 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 est directement tributaire des conditions d'utilisation du produit, dans notre cas le profil de charge. En particulier, dans le cas d'un profil de charge quasi-continu, les pertes de fonctionnement peuvent représenter une part largement majoritaire dans le GER et rendre ainsi l'optimisation sur cycle de vie superflue. Dans le cas d'une charge occasionnelle, nous pouvons nous trouver dans le cas contraire, avec cette fois-ci des pertes négligeables, donnant un GER quasiment proportionnel à la masse des parties actives. Ces deux cas extrêmes nous permettent grossièrement d'indiquer une limite ou de souligner la pertinence d'une étude d'éco-conception.

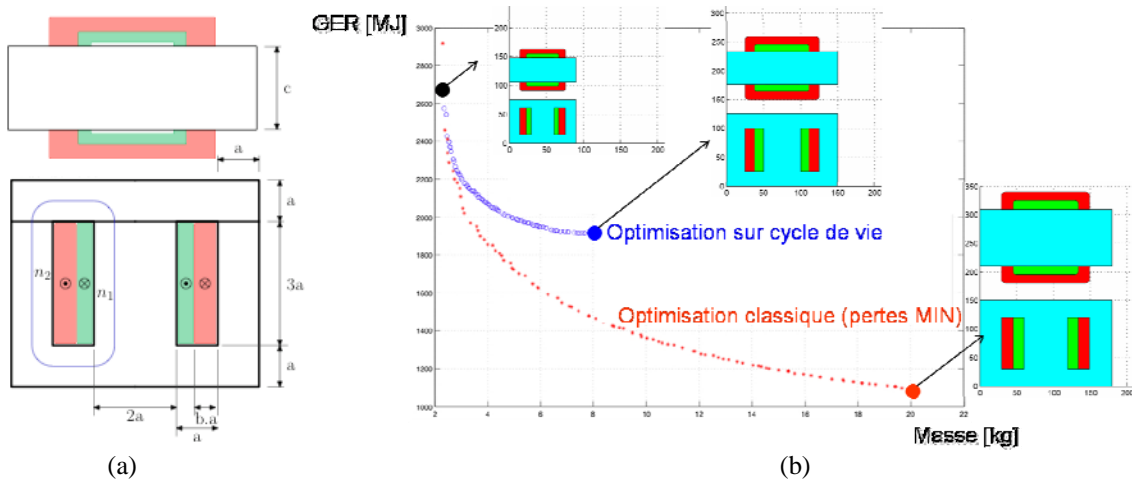


Figure 7 : (a) Paramètres géométriques du transformateurs [ESP_05]
 (b) Comparaison des optimisations « classique » et sur cycle de vie (230VA)

La méthodologie d'éco-conception choisie doit donc être directement liée au profil de charge, tout particulièrement lorsque le fonctionnement est constitué de cycles courts et ou très variables.

La seconde partie de l'étude résumée, mais non présentée ici, concernait 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 montre une sensibilité variable suivant le profil de charge choisi et de 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 (aluminium à la place du cuivre) entraîne des différences suffisamment importantes dans les résultats d'optimisation pour laisser penser qu'une méthode d'éco-conception doit prendre en compte cette possibilité.

Exemple 2 : Système de production PV autonome ou en site isolé [SEI_06]

La production d'électricité à partir de ressources renouvelables nécessite un investissement financier initial considérable. Plutôt que de ne considérer que ce coût, notre approche s'est basée sur le coût énergétique global sur cycle de vie (GER). Ce critère est bien représentatif de l'efficacité du système sur son cycle de vie. En effet, l'un des buts du développement des systèmes photovoltaïques étant de diminuer le recours aux réserves d'énergie fossile, il paraît pertinent de dimensionner le système de façon à consommer le moins d'énergie primaire fossile équivalente sur son cycle de vie (matériaux, fabrication, transport, installation, fonctionnement et recyclage).

Dans l'exemple présenté (Figures 8a et 8b), les données de ressource (rayonnement solaire) et de consommation sont considérées comme déterministes. On cherche ainsi à dimensionner au mieux le système qui fournira en électricité le consommateur. La démarche d'optimisation a ceci d'original qu'elle intègre également, en plus des paramètres de dimensionnement, des paramètres de gestion du système (délestage graduel de la production et action éventuelle sur la consommation) qui permettront, dans la mesure du possible, de mieux utiliser la source d'énergie renouvelable intermittente lorsque celle-ci est disponible.

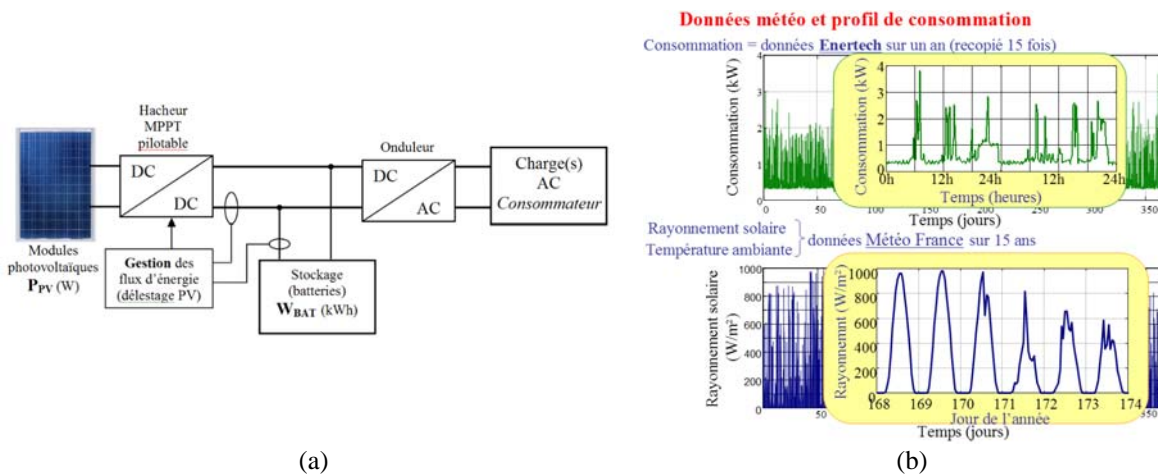


Figure 8 : (a) Système photovoltaïque autonome
 (b) Profils annuels de consommation et de rayonnement solaire (ressource)

La gestion de l'énergie échangée par la batterie, par exemple, peut avoir un impact significatif sur le coût énergétique global sur cycle de vie. En effet, le vieillissement des batteries (et donc leur coût en cyclage) est fortement dépendant de l'énergie qu'elles échangent avec le système.

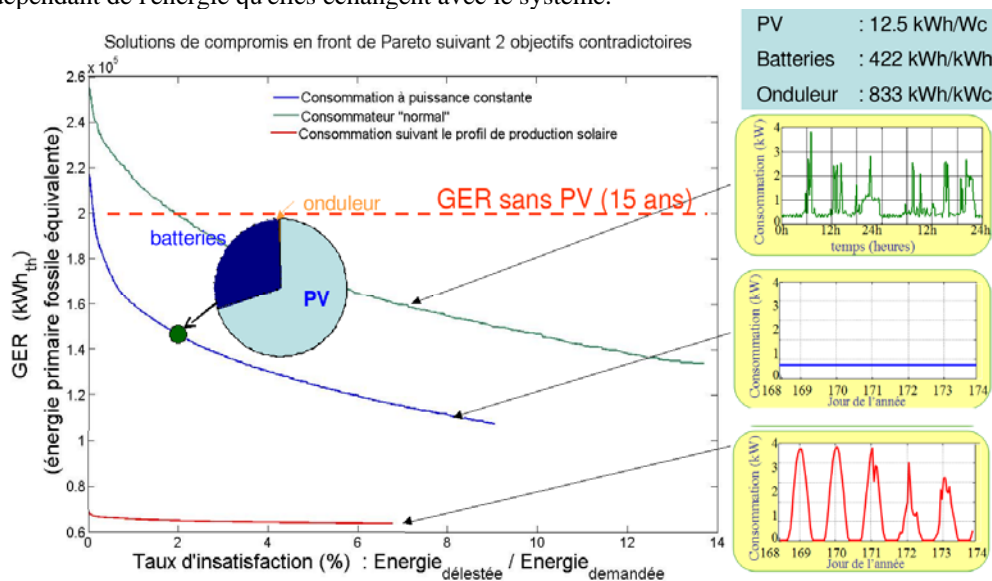


Figure 9 : Comparaison des fronts de Pareto : Energie globale consommée sur cycle de vie par le système relativement au taux d'insatisfaction de la fourniture d'énergie au consommateur pour trois profils.

De même, l'allure de la courbe de consommation jouera un rôle dimensionnant important. En effet, comme le montre la figure 9, l'allure de la courbe de consommation (ici 3 profils) peut réduire le coût énergétique global de façon très significative. Cette figure montre l'ensemble des solutions de Pareto (optimisations multi-objectifs) pour chaque type de profil de consommation, du plus favorable (en phase avec la ressource) au consommateur « réel », en passant par un profil constant. L'énergie utile consommée restant la même quel que soit le profil. Les objectifs d'optimisation étant le coût énergétique global sur cycle de vie (exprimé en kWh d'énergie fossile équivalente) et le délestage du consommateur. Notons que la présence du stockage et la nécessité de connaître son état de charge à chaque instant requièrent des simulations temporelles qui alourdissent significativement les optimisations.

Ces résultats montrent l'importance que prend le comportement du consommateur sur le coût du système et l'opportunité d'envisager son délestage afin de réduire son empreinte énergétique (et par corrélation le coût financier du système également).

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 photovoltaïques sur le lieu de consommation accroît la prise de conscience), voire le changement climatique qui aura un effet sur la productivité énergétique, comme sur la consommation des consommateurs, etc...

Les quelques exemples présentés montrent à quel point les optimisations sur cycle de vie sont délicates, voire très sensibles à des paramètres peu maîtrisables, d'où l'importance de ne pas mener des études d'une précision absurde.

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).

6- Bibliographie

[CHA_07] T. CHAIZE, « *The price of the natural gaz, future* », 10 sept. 2007; site web Dani2989 Matière 1^{ère}, <http://www.dani2989.com>.

[DEB_07] V. DEBUSSCHERE, H. BEN AHMED, B. MULTON, « *Eco-design of Electromagnetic Energy Converters : The case of the Electrical Transformer* », IEEE IEMDC 2007, Antalya (Turkey), CDROM proc., May 3-5, 2007.

[DEB_01] K. DEB, *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. Wiley, 2001.

[ESP_05] 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.

[IAE_07] International Energy Agency, *Keywords Energy Statistics*, rapport 2007.

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

[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.

[JOL_Web] O. JOLLIET, « *Industrial Ecology - Life Cycle Systems* », site Web EPFL, nombreuses informations en ligne dont base de données énergie et CO2.
http://gecos.epfl.ch/lcsystems/Fichiers_communs/Recherche/frameimpact2002.htm

[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_06] B. MULTON, H. BEN AHMED, V. DEBUSSCHERE, J. SEIGNEURBIEUX, M. RUELLAN, « *Ecoconception : de nouveaux critères de conception en électrotechnique pour le développement durable* », Journée d'étude SEE (club 13), Paris 7 décembre 2006.

[OBS_06] Observ'ER, *Huitième inventaire de la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde*, Edit. 2006.

[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.

[SEI_06] J. SEIGNEURBIEUX, G. ROBIN, H. BEN AHMED, B. MULTON, « *Optimization with Energy Management of PV Battery Stand-Alone Systems over Life Cycle* », 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, CDROM proc., 4-8 sept. 2006.

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

[SCOT_07] P.M. MOHR, « *Indices des prix des produits de base de la Banque Scotia* », bulletins mensuels, juillet, octobre et novembre 2007.

[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.

Les auteurs

Bernard Multon est Professeur des Universités à l'Antenne de Bretagne de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan et chercheur au Laboratoire SATIE (UMR CNRS 8029). Agrégé de Génie Electrique (1982), docteur de l'Université Paris 6 (1985) et habilité à diriger des recherches (1994), il a été successivement Professeur Agrégé à l'Université de Paris 11, Maître de Conférences à l'ENS de Cachan et chercheur au LÉSiR (URA CNRS), puis Professeur à l'antenne de Bretagne de l'ENS. Il enseigne l'électrotechnique en préparation à l'agrégation et en master et mène des travaux de recherche dans le domaine des actionneurs spéciaux et de l'exploitation des ressources énergétiques renouvelables sur le site de Bretagne de SATIE.

Hamid Ben Ahmed, Ingénieur en Génie électrique (1988), Docteur de l'Université Paris VI (1994) et HDR (2006), est maître de conférence à l'Antenne de Bretagne de l'ENS Cachan depuis 1997 et chercheur au laboratoire SATIE (UMR CNRS 8029). Ses activités de recherche portent sur la conception, la modélisation et l'optimisation de convertisseurs électromécaniques non-conventionnels ainsi que sur les systèmes de production d'électricité utilisant les énergies renouvelables.

Vincent Debusschere, ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan agrégé de Physique Appliquée, prépare, depuis septembre 2006, une thèse de doctorat, sur le site de Bretagne du laboratoire SATIE (UMR CNRS 8029), intitulée "Optimisation du dimensionnement des convertisseurs électromécaniques selon des critères d'éco-conception". Enseignement, dans le cadre d'un monitorat, en électrotechnique et écoconception en préparation à l'agrégation et en magistère de Mécatronique.

Julien Seigneurbieux, ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan agrégé de Physique Appliquée, prépare, depuis septembre 2005, une thèse de doctorat, sur le site de Bretagne du laboratoire SATIE (UMR CNRS 8029), intitulée " Contribution à l'optimisation des systèmes électriques de production intermittente, associés à accumulateur, connectés au réseau et flotables.". Il enseigne également, dans le cadre d'un monitorat, au département de GEII de l'IUT de Rennes.

Marie Ruellan, Ingénieur en mécatronique (INSA Strasbourg 2004), vient de soutenir (décembre 2007) sa thèse de doctorat de l'ENS de Cachan (site de Bretagne du laboratoire SATIE UMR CNRS 8029), intitulée « Modélisation et optimisation pour la conception d'un générateur électro-magnétique direct intégré et fortement couplé à un système houlogénérateur ».

Yaël Thiaux, ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan agrégé de Génie Electrique, prépare, depuis septembre 2007, une thèse de doctorat, sur le site de Bretagne du laboratoire SATIE (UMR CNRS 8029), intitulée " Optimisation des profils de consommation pour minimiser les coûts économique et énergétique sur cycle de vie des systèmes photovoltaïques hybrides". Il enseigne également, dans le cadre d'un monitorat, au département de GEII de l'IUT de Rennes.