

Etude des approches méthodologiques pour l'amélioration environnementale des performances en conception de systèmes complexes

Nicolas Tchertchian

▶ **To cite this version:**

Nicolas Tchertchian. Etude des approches méthodologiques pour l'amélioration environnementale des performances en conception de systèmes complexes. Autre. Ecole Centrale Paris, 2013. Français. NNT : 2013ECAP0047 . tel-00969164

HAL Id: tel-00969164

https://theses.hal.science/tel-00969164

Submitted on 2 Apr 2014

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.

ÉCOLE CENTRALE DES ARTS
ET MANUFACTURES
« ÉCOLE CENTRALE PARIS »

SEATECH
UNIVERSITÉ DU SUD TOULON VAR

THÈSE

présentée par

Nicolas TCHERTCHIAN

pour l'obtention du

GRADE DE DOCTEUR

Spécialité : Génie Industriel

Laboratoire d'accueil : LISMMA/ SEATECH – USTV

SUJET :

Etude des approches méthodologiques pour l'amélioration environnementale des performances en conception de systèmes complexes

Study of methodological approaches for improving environmental performance in complex system design

Soutenance prévue le : 17 Juillet 2013 à Toulon

devant un jury composé de :

Professeur Emmanuel CAILLAUD, directeur ENSAM Metz	Rapporteur
Professeur Nicolas PERRY, I2M/ ENSAM Bordeaux	Rapporteur
Professeur André MARGAILLAN, directeur MAPIEM/ USTV	Examinateur
Professeur Carmine BIANCARDI, Université de Naples, Italie	Examinateur
Professeur Dominique MILLET, LISMMA/ SEATECH - USTV	Directeur de thèse
Pierre-Alain YVARS, MCF HDR, LISMMA/ SUPMECA St Ouen	Co-Directeur de thèse

2013ECAP0047

Abstract

The tendency towards a homogenous mode of development modeled on that of Western countries means that sustainable development has become increasingly urgent. In order to implement such development, it is not enough to make superficial reductions of environmental impacts; it is necessary to thoroughly redefine products and their expected performances in such a way that the consequences are compatible with sustainable development. Many ecodesign tools have been developed to meet the requirements of sustainable development. However, these tools are not generally suitable for the design of complex systems because there are either too specific, too general or based on rules of thumb often unverifiable. That is why we propose in this research to develop a methodological approach for ecodesign complex systems.

This research work has led us to develop four methodological approaches each time to provide answers to the identified problem areas:

1. Are the current eco-design tools adapted to take into account the multiple dimensions of system design?
2. How to identify and hierarchize the most promising areas of environmental improvement at the early stages of the design process?
3. How to determine technological solutions adapted to a complex system and guarantee the best environmental performance?
4. Which are the necessary features for optimal environmental performances for a complex system?

First, the Pareto / LCA approach, introduced in Chapter 3, is based on a simplification of the system considering that the main sources of impact are generated by a small part of it. It consists of a succession of LCA for each proposed alternative; it is a tedious process optimization. However, this approach provides “good” results and is well suited to designers’ reasoning. Indeed by their industry experience and knowledge of the product, the designer can easily identify the main contributors to impacts.

Then we developed an approach presented in Chapter 4 that combines Design of Experiment (DoE) and LCA. This approach is based on a complete modeling of the product. The main contribution of the DoE / ACV approach is the ability to prioritize the system parameters according to their influence on the environmental performance of the system.

To address the limitations identified in the study of the two previous tools we have proposed a new methodological approach based on Constraint Satisfaction Problem (CSP) combined with LCA and presented in Chapter 5. The most time consuming step is to model the system (definition of design parameters, constraints, equation and performance). It is necessary to gather information about each process and system components, the use phase, maintenance, etc.

The advantage over previous tools is the ability of the approach to ensure a complete set of solutions, allowing the designer to choose a good one that complies to environmental

performance and constraints specified in the definition specifications.
In addition to the CSP / LCA approach, we propose an EcoCSP approach, in Chapter 6. In it, the functional specifications are no longer “frozen”. The approach EcoCSP allows us to understand the configuration of the product corresponding to a change in functional performance. The EcoCSP is used to make functional trade-offs that affect the functional unit of the system with the consequences this entails.

Key-words: Eco-design; Complex system; Sustainable development; Life-Cycle Assessment (LCA); Constraint satisfaction problem (CSP); ship design

Résumé

Avec l'homogénéisation d'un mode de développement à l'image de celui des pays occidentaux les ressources terrestres sont de plus en plus mises à mal rendant de plus en plus urgent un développement durable. Pour atteindre un tel développement, il est nécessaire d'intégrer la dimension environnementale dès les premières étapes du processus de conception de produits. De nombreux outils d'écoconception ont été développés pour satisfaire aux conditions du développement durable. Cependant, ces outils ne sont généralement pas adaptés à la conception de systèmes mécaniques complexes car soit trop spécifiques soit trop généraux ou reposent sur des règles empiriques souvent invérifiables. C'est pourquoi nous proposons dans ce travail de recherche de mettre en place une méthodologie et des outils adaptés à la conception de systèmes complexes.

Les travaux effectués nous ont amenés à développer 4 approches méthodologiques permettant à chaque fois d'apporter des réponses aux aspects problématiques identifiés :

1. Les outils d'écoconception actuels sont-ils adaptés à la prise en compte des dimensions multiples de la conception de systèmes ?
2. Comment identifier et hiérarchiser les axes d'amélioration environnemental les plus prometteurs ?
3. Comment déterminer les solutions technologiques adaptées à un système complexe et garantissant la meilleure performance environnementale ?
4. Quelles fonctionnalités pour des performances environnementales optimales pour un système complexe?

D'abord, l'approche Pareto/ ACV, introduit dans le chapitre 3, repose sur une simplification du système en considérant que les principales sources d'impact sont générées par une faible partie du système. C'est une approche qui consiste à réaliser une succession d'ACV pour chaque alternative proposée, c'est un processus d'optimisation fastidieux. Toutefois Cette approche fourni des résultats « justes » et est bien adaptée aux raisonnements des concepteurs. En effet par leur expérience du métier et par leur connaissance du produit, le concepteur peut facilement identifier les principaux contributeurs d'impacts.

Nous avons, ensuite, développé une approche combinant plans d'expériences et ACV, présentée dans le chapitre 4. Cette approche s'appuie sur une modélisation complète du produit. Le principal apport de la méthode DoE/ ACV est la possibilité de hiérarchiser les paramètres du système en fonction de leur influence sur la performance environnementale du système.

Afin de répondre aux limites identifiées lors de l'étude des deux outils précédents nous avons proposé une nouvelle approche basée sur la satisfaction des contraintes (CSP) combinée avec l'ACV et présentée dans le chapitre 5. La phase la plus fastidieuse consiste à modéliser le système (définition des variables de conception, des contraintes du système sous la forme d'équation et des variables de performances que l'on souhaite satisfaire). Il est nécessaire de recueillir des informations sur chaque processus et composants du système, sur la phase

d'usage, la maintenance, etc.

L'avantage par rapport aux outils précédents est la capacité de l'outil à garantir un ensemble complet de solutions et permet au concepteur de choisir une solution valable selon des variables de performance (amélioration de la performance environnementale selon des indicateurs environnementaux) et contraintes spécifiées lors de la définition du cahier des charges.

En complément à l'approche CSP/ ACV, nous avons proposé l'approche EcoCSP, dans le chapitre 6, dans laquelle les spécifications fonctionnelles ne sont plus figées. La méthode ecoCSP permet d'appréhender la configuration de l'architecture produit correspondant à une évolution des performances fonctionnelles. L'approche méthodologique EcoCSP est utilisée pour faire des arbitrages fonctionnels qui modifient l'unité fonctionnelle du système avec les conséquences que cela entraine.

Mots-clés : Ecoconception, Systèmes mécaniques complexes, Analyse du Cycle de Vie (ACV), Satisfaction de contraintes (CSP) ; Conception navale ; Développement durable

Table des matières

Table des matières ..... **i**

Liste des figures ..... **iii**

Liste des tableaux ..... **iv**

Avant-Propos ..... **v**

Remerciements ..... **vi**

Résumé étendu **1**

Introduction générale **6**

Ecoconception de systèmes complexes *6*

Positionnement de la recherche *7*

Les axes de recherche présentés *8*

Structure du mémoire *8*

Chapitre 1. Ecoconception et développement durable **10**

1.1. Contexte Général *10*

1.1.1. Développement durable/ Contexte de crise 10

1.1.2. Vers une consommation raisonnée des ressources dans l'industrie 11

1.1.3. Comment concevoir des produits « durables » 12

1.2. Contexte de recherche *14*

1.2.1. Ecoconception et développement durable 14

1.2.2. L'Analyse de cycle de vie 15

1.2.3. Conception de systèmes complexes 19

1.3. Problématique *20*

1.3.1. Ecoconception de systèmes complexes 20

1.3.2. Les limites de l'analyse de cycle de vie dans la prise en compte des multiples dimensions de la conception 21

1.3.3. Comment identifier et hiérarchiser les axes d'amélioration les plus prometteurs. 21

1.3.4. Comment déterminer les solutions technologiques adaptées à un système complexe tout en garantissant la meilleure performance environnementale ? 22

1.3.5. Quelles fonctionnalités pour des performances environnementales d'un système complexe optimales ? 22

1.3.6. Synthèse 22

Chapitre 2. Démarche de recherche 24

2.1. Etat de l'art général 24

2.1.1. Les limites des outils d'écoconception pour l'amélioration environnementale des produits 24

2.1.2. Le cahier des charges d'une méthodologie d'écoconception de systèmes complexes . 24

2.1.3. Remise en cause des fonctionnalités dans le cadre d'une démarche d'écoconception innovante 25

2.2. Méthodologie générale 26

2.2.1. Présentation générale 26

2.2.2. Axe 1 : Approche Intuitive (Pareto/ ACV) 26

2.2.3. Axe 2 : Approche Plans d'expérience/ ACV 27

2.2.4. Axe 3 : Approche CSP/ ACV 28

2.2.5. Axe 4 : Approche EcoCSP, extension de l'approche CSP/ ACV 28

2.3. Champs expérimentaux mobilisés 30

2.3.1. Méthode d'Aide à la Conception de Produits Mécatroniques Remanufacturables (MacPMR) 30

2.3.2. Diesel Electro Engine Ship System Eco-compatible (DEESSE) 31

Chapitre 3. Paper #1: 33

Chapitre 4. Paper #2: 34

Chapitre 5. Paper #3: 35

Chapitre 6. Paper #4 36

Chapitre 7. Discussion générale 38

Conclusions and perspectives 41

Résumé 41

Contributions 42

Limites 42

Perspectives 43

Publications & communications 45

Références 47

Liste des figures

Figure 1 : Niveaux d'éco-conception et facteur d'amélioration de l'éco-efficacité (adapté de (Brezet, 1998)) 13
Figure 2 : Marge de liberté durant le processus de conception (d'après (Atik, 2001)) 16
Figure 3 : Phases d'une analyse du cycle de vie (d'après Norme ISO 14040) 17
Figure 4 : Approche d'écoconception basée sur l'ACV 18

Liste des tableaux

Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée.

Avant-Propos

Ce mémoire de thèse formalise le travail accompli au sein de l'équipe EOP du laboratoire LISMMA dans le cadre de deux projets de recherche :

- Le programme de recherche MACPMR (2007-2010) cofinancé par l'ADEME et la fondation CETIM. Ce programme de recherche consiste à développer une **M**éthodologie d'**A**ide à la **C**onception de **P**roduits **M**écatroniques **R**emanufacturables.
- Le projet de recherche DEESSE (2009-2012) subventionné par le Fonds Unique Interministériel (FUI) en soutien aux projets de recherche et développement collaboratifs des pôles de compétitivité. Ce projet a l'ambition de développer une méthodologie d'écoconception de systèmes mécaniques complexes à travers la conception d'une navette maritime hybride « **D**iesel **E**lectro **E**ngine **S**hip **S**ystem **E**co-compatible ».

Ce mémoire est présenté comme une série d'articles scientifiques publiés dans des revues internationales. Des chapitres généraux assurent des introductions et des liens logiques entre les papiers.

Les articles suivants inclus dans le mémoire ont été publiés :

- Tchertchian N., Millet D., El Korchi A., 2012, "Design for Remanufacturing: What performances can be expected?", International Journal of Environmental Technology and Management, 2012 Vol.15, No.1, pp.28 - 49
- Millet, D., Tchertchian, N., Brissaud, D., 2009. How to identify the most promising areas of environmental improvement at the early stage of the design process. Int. J. Design Engineering. 2 (3), pp.299-319.
- Tchertchian, N., Millet, D., Yvars, P. A., 2013. Benefits and limits of a CSP/LCA approach for the ecodesign of complex systems. A case applied to a hybrid passenger. Journal of Cleaner Production, 2013 Vol. 42, No. 1, pp.1 – 18

L'article suivant est en cours de soumission :

- Tchertchian, N., Millet, D., Yvars, P. A., 2012. The influence of the level of definition of functional specifications on the environmental performances of a complex system. The EcoCSP approach. Int Journal of Life cycle Assessment.

Et en annexe :

- Tchertchian N., Millet D., Pialot O., 2013, "Modifying module boundaries to design remanufacturable Products: The Modular Grouping Explorer tool", Journal of Engineering Design, 2013 Vol.X, No.X, pp. xx – xx

Remerciements

Il me sera très difficile de remercier tout le monde car c'est grâce à l'aide de nombreuses personnes que j'ai pu mener cette thèse à son terme.

Je voudrais tout d'abord remercier grandement mon directeur de thèse, Dominique Millet, pour toute son aide. Je suis ravi d'avoir travaillé en sa compagnie car outre son appui scientifique, il a toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de l'élaboration de cette thèse. Je remercie également Pierre-Alain Yvars qui m'a co-encadré durant cette thèse sur la partie programmation par contraintes.

Les Professeurs Emmanuel CAILLAUD et Nicolas PERRY m'ont fait l'honneur d'être rapporteurs de ma thèse. Leurs remarques m'ont permis d'envisager mon travail sous un autre angle. Pour tout cela je les remercie.

Je tiens à remercier le Professeur Carmine BIANCARDI pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse et pour sa participation dans le projet DEESSE.

Je remercie également le Professeur André MARGAILLAN pour l'honneur qu'il me fait d'être dans mon jury de thèse.

Je remercie la directrice de Supmeca Toulon, Pascale Azou Briard, pour m'avoir accueilli au sein de l'établissement pendant toutes ces années en m'apportant toutes les conditions au bon déroulement de la thèse. Je tiens à remercier tout le personnel pédagogique de Supméca ainsi que le personnel administratif pour leurs encouragements et leur soutient en particulier Sabine pour la gestion des déplacements et des ordres de mission, Olivier pour la gestion administrative des projets, Ingrid pour la constitution des plannings de cours et enfin Lucette avec une pensée pour Christian qui a pris sa retraite au cours de la thèse et dont je garde le souvenir de notre séjour à Braunschweig. Sans oublier le soutien et le support technique apporté par Sabine et Christian.

Je remercie tous les chercheurs de l'équipe de recherche EOP. D'abord les doctorants avec lesquels j'ai eu le plaisir de travailler sur différents projets, Akram, Haining, Galina ainsi que Vincent pour son accueil lors de mes séjours parisiens et son aide précieuse dans le domaine des CSP. Les Ingénieurs de recherches Livier et Alexandre ainsi qu'Olivier de m'avoir supporté comme voisin de bureau mais aussi et surtout pour toutes nos discussions et ses conseils, que j'ai plus ou moins écoutés, qui m'ont accompagné tout au long de la thèse.

Je dois également mes remerciements à tous les membres du projet MacPMR et aux organismes CETIM et ADEME qui ont financé ce projet. Ainsi qu'au consortium du projet DEESSE : STR Europe, SI des Moteurs Baudouin et ECA Robotics ainsi que la DGCIS et les collectivités territoriales Conseil régional PACA, TPM et le conseil général des Alpes Maritimes qui ont financé ce projet labellisé par le Pôle mer Méditerranée.

Je remercie toutes les personnes (et la liste est très longue) avec qui j'ai partagé des moments plus ou moins longs et qui ont marqué à différents niveaux un cursus post bac de presque 10 ans.

Pour conclure cette énumération de remerciements ce sont mes parents et ma sœur qui

m'ont soutenu plus que de raison et aider à surmonter les moments difficiles et sans qui cette thèse n'aurai pas eu lieu. Ils ont cru en moi et ouf ! Maintenant j'y suis ! Alors maman, papa, Anne-Sophie merci !

Mes derniers remerciements vont à ma Grand-Mère Odette qui a tout fait pour m'aider, qui m'a soutenu et surtout supporté dans tout ce que j'ai entrepris, malheureusement elle est partie un an avant le terme de cette aventure. Je sais qu'elle est fière de moi de là-haut. Je lui dédie cette thèse.

J'oublie certainement beaucoup de personnes et je m'en excuse.

Encore un grand merci à tous pour m'avoir conduit à ce jour mémorable.

A Ma grand-mère Odette, et à Lenzo mon neveu.

Résumé étendu

La croissance démographique mondiale, le développement économique des pays émergents, l'homogénéisation d'un mode de développement à l'image des pays occidentaux rend de plus en plus urgent un développement durable. Celui-ci enjoint à chaque acteur, et notamment l'acteur industriel, pilier de l'évolution des sociétés développées, d'équilibrer les dimensions économique, sociale, et environnementale de son activité. Pour atteindre un tel développement il ne suffit plus de réduire superficiellement les impacts générés par l'activité humaine ; il est nécessaire de redéfinir complètement le produit et les performances attendues de façon à ce que leurs conséquences soit compatibles avec le développement durable.

Afin de concevoir des produits durables et plus respectueux de l'environnement de nouvelles règles de bonnes pratiques ont été mis en place : l'écoconception ou l'intégration des aspects environnementaux en conception et le développement de produits a pour objectifs de réduire les impacts environnementaux qu'ils génèrent tout au long de leur cycle de vie.

Toutefois les résultats, bien que significatifs, ne sont pas à la hauteur des enjeux inscrits dans cette conception révolutionnaire du développement de la société mondiale. En effet les gains obtenus ne reposent que sur des remises en cause superficielles des méthodologies de conception utilisées, et ne permettent qu'une réduction marginale des performances environnementales des produits et procédés ainsi conçus.

En effet, les outils existants étant généralement inadaptés pour développer des systèmes mécaniques complexes qui sont caractérisé par un nombre important de sous-systèmes interdépendants, différentes alternatives de conception affectées par des modes de fonctionnement variés.

Les outils d'amélioration environnementale, basées sur des lignes de conduite ou checklists, ne sont généralement pas adaptés à la conception de systèmes mécaniques complexes car soit trop spécifiques soit trop généraux ou reposent sur des règles empiriques souvent invérifiables. Les outils d'évaluation environnementale, comme l'analyse de cycle de vie mobilise trop de ressources pour comprendre les causes des impacts au détriment d'un travail d'interprétation et de recherche des voies d'amélioration. C'est pourquoi nous proposons dans ce travail de recherche la mise en place d'une méthodologie et des outils adaptés à la conception de systèmes complexes, qui pour être plus efficaces doivent être intégrés au plus tôt dans le processus de conception.

L'approche que nous proposons répond à un cahier des charges élaboré à partir des limites identifiées sur les approches existantes, elle doit :

- Etre peu consommatrice de ressources et de temps
- Etre facilement appropriable par le concepteur
- Etre rigoureuse
- Avoir (permettre) des résultats facilement interprétables
- Permettre d'explorer le champ du possible

- Etre facilement ré-exploitable

Nos travaux de recherches nous ont amené à développer 4 outils d'écoconception, appliqués dans différents contextes ces outils permettent de répondre à des problématiques différentes.

Positionnement de recherche

Cette thèse s'appuie sur les travaux réalisés dans le cadre de deux programmes de recherche indépendants. Le programme de recherche MACPMR (2007-2010), cofinancé par l'ADEME et la fondation CETIM, qui consiste à développer une méthodologie de conception pour des produits mécatroniques remanufacturables et le programme DEESSE (2010-2012) subventionné par le Fonds Unique Interministériel (FUI) en soutien aux projets de recherche et développement collaboratifs des pôles de compétitivité, qui consiste à la mise en place d'une méthodologie d'écoconception de systèmes mécaniques complexes appliquée à une navette maritime hybride « Diesel/ Electrique » Eco-compatible (DEESSE).

De ces deux programmes de recherche ont émergé plusieurs problématiques pouvant se résumer, de façon synthétique, par les questions qui suivent :

1. Les outils d'écoconception actuels sont-ils adaptés à la prise en compte des dimensions multiples de la conception de systèmes ?
2. Comment identifier et hiérarchiser les axes d'amélioration environnemental les plus prometteurs ?
3. Comment déterminer les solutions technologiques adaptées à un système complexe et garantissant la meilleure performance environnementale ?
4. Quelles fonctionnalités pour des performances environnementales optimales pour un système complexe?

La définition de ces questions de recherche a permis d'identifier différents domaines bibliographiques

- Axe 1: Approche Intuitive (Pareto/ ACV)

L'approche « Pareto »/ ACV consiste à une optimisation intuitive des systèmes ou sous-systèmes apparaissant comme les plus impactants. Selon la loi empirique de Pareto, environ 80 % des effets sont le produit de 20 % des causes, en se focalisant sur ces 20% du système le concepteur peut espérer une réduction importante des impacts environnementaux. Dans cette approche le concepteur prend appui sur sa compréhension implicite du système. Ce raisonnement intuitif consiste à optimiser par tâtonnement les éléments des principaux sous-systèmes afin d'améliorer globalement les performances du système. Mis en application dans le cadre de la conception de produits remanufacturables, cela se traduit par la modélisation de scénarios correspondant à la variation des paramètres : nombres de modules remanufacturés, nombre de cycles de remanufacturing, durée entre chaque cycle, localisation du/ des centres de remanufacturing. Dans la pratique cela conduit à devoir évaluer de nombreux scénarios.

- Axe 2: Approche Plans d'expérience/ ACV

L'état de l'art traduit un manque de supports méthodologiques qui permettraient aux équipes de conception d'organiser les différents axes d'amélioration/ innovation hiérarchiquement le

plus tôt possible dans la phase de conception. L'approche Plan d'expérience/ ACV consiste à utiliser un plan d'expérience à x niveaux afin d'identifier la contribution de chaque paramètre sur la performance environnementale globale (évaluée, dans un premier temps à l'aide de la méthode end-score EI99). Pour chaque niveau expérimental une évaluation de la faisabilité technico-économique et de la satisfaction (sur une échelle de 1 à 10) sont proposées.

L'approche plan d'expériences/ ACV permet de hiérarchiser chaque axe d'amélioration par l'évaluation du taux d'amélioration environnemental. Le taux d'amélioration est accompagné d'une évaluation de la faisabilité technico-économique et de l'attractivité pour l'utilisateur. Ces informations aident l'équipe de conception à faire des choix réalistes pour l'entreprise (en tenant compte du budget), acceptables par l'utilisateur (compte tenu de ce que l'utilisateur est prêt à faire ou à accepter) et respectueux pour l'environnement.

- Axe 3 : Approche CSP/ ACV

L'état de l'art met en évidence l'inexistence d'outils d'écoconception pour les phases amont de la conception de produits, particulièrement dans le domaine des systèmes complexes. Un système complexe possède de nombreux sous-systèmes interdépendants, plusieurs alternatives de conception pour chaque sous-système, des conditions d'utilisation variables affectant le choix des solutions technologiques et des performances environnementales ; c'est en outre un système qui évolue tout au long du cycle de vie et en interaction avec l'environnement extérieur. Ces caractéristiques mènent rapidement à un grand nombre de configurations à évaluer pour identifier le système optimal sur le plan de l'environnement (de façon multicritère et sur l'ensemble du cycle de vie). Pour éco-concevoir un tel système le plus en amont possible nous avons développé une approche combinant les algorithmes de résolution de problème par satisfaction de contraintes et l'Analyse de Cycle de Vie. CSP/ ACV a fait l'objet d'une application dans un projet d'éco-conception d'une navette maritime de transport de passager à motorisation hybride. Les résultats obtenus sont comparés avec les approches Pareto/ ACV et DoE/ ACV selon différents critères : temps d'utilisation, de formation, d'exploration du champ du possible, d'interprétabilité des résultats et de ré-exploitabilité. Les résultats font apparaître que la démarche CSP/ ACV présente des avantages en particulier sur les critères d'exploration du champ du possible, d'interprétation des résultats et sur le gain de temps permis par la ré-exploitation des résultats obtenus sur des systèmes proches.

- Axe 4 : Extension de l'approche CSP/ ACV

L'objet de cet article est de présenter une approche, basée sur la combinaison des méthodes d'analyse de cycle de vie (ACV) et de résolution de problèmes par satisfaction de contraintes (CSP), capable de résoudre le problème de la définition de l'unité fonctionnelle en générant une architecture optimisée et d'associer des spécifications fonctionnelles négociées. En effet aujourd'hui l'ACV impose d'avoir une unité fonctionnelle figée et donc de devoir attendre la fin du processus de conception pour évaluer le système. L'approche, appelée ecoCSP, permet la spécification des performances négociables (Functional Requirement Negotiable) afin de tendre vers un optimum environnemental correspondant à un cahier des charges

acceptables. L'approche ecoCSP est déployée afin de définir les performances fonctionnelles d'une navette maritime à passagers écologique sur son cycle de vie.

Apports et perspectives

Nous avons mis en œuvre différentes approches méthodologiques pour l'amélioration environnementale en conception. Ces différentes approches sont adaptées à différents champs d'application :

- L'approche « de Pareto »/ ACV semble plus particulièrement utile pour des problèmes d'optimisation locale ; elle permet de répondre rapidement à des problèmes de choix de matériaux ou des choix de configurations simples.
- L'approche Plan d'expérience/ ACV semble elle plus adaptée à des problèmes de configuration de produits (choix d'architectures) lorsque les fonctionnalités des produits sont figées. L'approche est à privilégier pour des produits simples disposant de peu de solutions.
- L'approche CSP/ ACV (et EcoCSP) semble plus particulièrement destinée à traiter des problèmes d'optimisation globale (choix de technologies) incluant l'optimisation fonctionnelle du système. Elle semble peu adaptée à des problèmes d'optimisation locale. L'utilisation d'une approche CSP/ ACV n'est pertinente que dans le cas où l'on dispose d'un modèle analytique du système à concevoir le plus complet possible.

Notre principale contribution touche à la conception de systèmes complexes. La complexité des couplages entre sous-systèmes et la multitude de composants et de solutions technologiques potentielles nécessitent l'utilisation d'outils « intelligents » qui tout en simulant de nombreux scénarios aident le concepteur à effectuer les bons réglages et choix technologiques et ce dès les premières étapes de la conception. Nous sommes convaincus qu'il est nécessaire de procéder à une négociation des performances fonctionnelles afin de parvenir à réduire drastiquement l'empreinte environnementale.

Les perspectives de recherche de nos travaux consisteraient à développer les 3 pistes d'amélioration suivantes :

1. Le développement de l'approche CSP/ ACV

Il faudrait expérimenter plus largement cette approche pour en mesurer sa sensibilité et sa robustesse vis-à-vis de navires ayant des modes de navigation et des conceptions totalement différentes. De même, il faudrait déployer l'approche sur d'autres systèmes complexes comme l'automobile ou moins complexes pour valider l'intérêt d'une telle approche dans d'autres domaines.

2. L'adoption de l'outil par les entreprises et le concepteur

Une autre piste de travail concernerait l'adoption de l'outil en entreprise. Aujourd'hui la modélisation du problème demande de développer dans un langage de programmation de type C++ avec le risque de rebuter le concepteur. D'où la nécessité de développer un langage « concepteur » permettant la description d'un modèle, plus complet (qu'avec les outils actuels) qu'aujourd'hui, sous forme de CSP en manipulant directement les notions de fonctions, fonctions élémentaires, ensembles et entités… classiques dans de nombreux

modèles de conception.

3. L'intégration de la négociation de l'unité fonctionnelle dans l'ACV

Pour limiter la dégradation de l'expérience utilisateurs et les impacts économiques induits par la modification des spécifications fonctionnelles, des mesures pour inciter les utilisateurs à modifier leur habitudes sont souvent nécessaires. Une réflexion sur les conséquences d'une négociation fonctionnelle devrait être menée pour éviter un déséquilibre entre les 3 piliers du développement durable : économique, environnemental et social. Par exemple, en intégrant une évaluation des conséquences économiques et sociales des mesures…

Introduction générale

Ecoconception de systèmes complexes

La diminution des ressources alimentaires, minérales et énergétiques dans une société surpeuplée (6 milliard d'habitant aujourd'hui et 9 milliard prévu en 2050) provoquent une augmentation du prix des ressources, incompatible avec une vie décente des populations. A partir des années 80 le concept de développement durable a été proposé pour faire face à cette crise environnementale ; celui-ci enjoint à chaque acteur, et notamment l'acteur industriel, pilier de l'évolution des sociétés développées, d'équilibrer les dimensions économique, sociale, et environnementale de son activité. Cette prise de conscience environnementale s'est traduite dans l'industrie par une modification progressive des produits, procédés et méthodologies de conception orientées développement durable. Les résultats, bien que significatifs, ne sont toutefois pas à la hauteur des enjeux inscrits dans cette conception révolutionnaire du développement de la société mondiale. En effet les gains obtenus, ne s'appuyant que sur des remises en cause superficielles des méthodologies de conception utilisées, ne permettent qu'une réduction marginale des performances environnementales des produits et procédés ainsi conçus. Différentes publications scientifiques (Daly 1973; Simonis 1985; Williams et al. 1987; Herman et al. 1989; Ayres and Kneese 1990; Freeman 1992) ont rendu compte de la radicalité du saut quantitatif et qualitatif à opérer en mobilisant des expressions comme factor X, écologie industrielle, économie de fonctionnalité, dématérialisation, Product Service-System… Toutes ces appellations ont notamment ceci de commun qu'elles imposent la nécessité d'agir bien plus tôt dans le processus de conception ; la clé étant que plus l'intervention est positionnée en amont du processus de développement et plus la marge de liberté de l'équipe de conception est grande. Cela induit d'une part que cette équipe peut considérer un plus grand nombre d'alternatives et que d'autre part une remise en cause plus profonde peut être envisagée (intégrant par exemple un changement de comportement de l'utilisateur, ou en prenant en compte un système d'ordre supérieur générant une dématérialisation,…) au sein du collectif multidisciplinaire réuni en début de conception. La décennie 2000 marque un tournant dans la prise de conscience des enjeux environnementaux ; plusieurs facteurs à cela : les effets du réchauffement climatique sont désormais visibles (fontes des glaciers), l'opinion publique est de plus en sensible aux problèmes environnementaux, le prix du baril de pétrole ne cesse de croitre et la fin de l'ère du pétrole semble inéluctable sous peu, les gouvernements des pays les plus industrialisés ont des objectifs de réduction d'émission de Gaz à Effet de Serre à atteindre pour respecter le protocole de Kyoto. D'un point de vue environnemental en France comme en Europe, le secteur du transport est fortement responsable de l'accroissement de la consommation d'énergie, des émissions polluantes et de Gaz à Effet de Serre. Ce secteur est à l'origine de 25% des émissions de CO2 (CITEPA, 2009) et de plus de 30% de la consommation d'énergie en Europe (ADEME 2008). La diminution des consommations et

émissions unitaires des véhicules apparait ainsi comme une priorité. Il est nécessaire de transporter mieux ou différemment en favorisant par exemple un report des trafics routiers vers des modes moins polluants, mais également en visant à diminuer les consommations et émissions des modes de transports alternatifs, comme le transport public urbain : bus électrique, tramway, vélo, covoiturage, transport locatifs, navettes maritimes…

A ce jour un certain nombre de collectivités concernées ont la volonté de mettre en place, lorsque la géographie s'y prête, des services de transport public réguliers sur voie d'eau (maritimes, fluviaux ou lacustres) privilégiant l'aspect propre de ce mode de transport. L'énergie électrique est une alternative plus propre que l'utilisation d'énergie fossile (dans la phase utilisation du cycle de vie) mais comporte de nombreux inconvénients en termes de compétitivité face aux motorisations thermiques : faible autonomie, faible puissance à l'accélération, poids des batteries, temps de recharge… Une solution mixte dite « Hybride » associant motorisation Diesel avec une motorisation Electrique permettrait de pallier les insuffisances techniques du moteur électrique en phase de grande vitesse. En outre les avantages environnementaux d'une motorisation électrique par rapport au Diesel ne sont pas évidents et demandent à être évalués puis mesurés sur l'ensemble du cycle de vie du véhicule. Une navette maritime pour le transport de passagers est un système complexe qui possède de nombreux sous-systèmes interdépendants, plusieurs alternatives de conception pour chaque sous-système, des conditions d'utilisation variables affectant le choix des solutions technologiques et des performances environnementales. C'est un système qui évolue tout au long du cycle de vie (usure, refit) et en interaction avec l'environnement extérieur (Krob, 2009), (Cilliers 1998). Par conséquent l'objectif de la conception de systèmes complexes est d'assurer l'intégration appropriée de diverses fonctions, des techniques et des solutions technologies en respectant les meilleures performances environnementales sur son cycle de vie (Argarwal and Mukkamala, 2005). L'intégration de la dimension environnementale dans le processus de conception de ces systèmes est particulièrement délicate. Aujourd'hui les approches traditionnelles d'écoconception permettent soit de réaliser des évaluations environnementales à des fin curatives (ACV) (Hauschield, 2005), soit d'orienter le concepteur vers des solutions améliorées par le biais de « guidelines » (Wimmer, 2003). Ces deux types d'approches, utilisées pour concevoir des systèmes complexes, peuvent conduire à des sous-optimisations locales inadaptées à la conception de systèmes complexes. Il semble nécessaire de mettre en œuvre de nouvelles pratiques d'écoconception pour diminuer les impacts environnementaux et plus particulièrement la consommation d'énergie en s'appuyant sur une combinaison de solutions : changement technologique, redéfinition du besoin des utilisateurs, redimensionnement au juste nécessaire des performances, utilisation de matières renouvelables…

Positionnement de la recherche

Cette thèse s'appuie sur les travaux réalisés dans le cadre de deux programmes de recherche indépendants. Le premier programme de recherche, cofinancé par l'ADEME et la

fondation CETIM, consiste à développer une méthodologie de conception pour des produits mécatroniques remanufacturables. Trois axes de recherche ont été développés au cours de ce projet :

- La définition de Scénarios d'Upgrade, avec notamment la définition du nombre de cycles, leur durée et les évolutions fonctionnelles à intégrer au cours de ces cycles
- La définition d'architectures de Produit potentielles permettant d'aider les concepteurs à faire les meilleurs regroupements modulaires en vue du remanufacturing
- La définition de structures de Reverse supply-chain potentielles en s'appuyant sur une liste de 18 Structures Génériques de RSC.

Le deuxième programme de recherche, subventionné par le Fonds Unique Interministériel (FUI) en soutien aux projets de recherche et développement collaboratifs des pôles de compétitivité, a eu pour ambition de développer une navette maritime hybride « Diesel/ Electrique » Eco-compatible. A travers la conception de ce système mécanique complexe, l'objectif était de proposer une méthodologie d'écoconception alternative aux méthodes existantes non adaptées aux produits/ systèmes complexes.

De ces deux programmes de recherche ont émergé plusieurs problématiques imbriquées pouvant se résumer, de façon synthétique, par les questions qui suivent :

1. Les outils d'écoconception actuels sont-ils adaptés à la prise en compte des dimensions multiples de la conception de systèmes ?
2. Comment identifier et hiérarchiser les axes d'amélioration environnemental les plus prometteurs ?
3. Comment déterminer les solutions technologiques adaptées à un système complexe et garantissant la meilleure performance environnementale ?
4. Quelles fonctionnalités pour des performances environnementales optimales pour un système complexe?

Les axes de recherche présentés

Ces différentes questions nous ont amené à développer 4 approches méthodologiques d'écoconception différentes:

- L'approche « Pareto/ ACV ».
- L'approche « Plans d'expérience/ ACV »
- L'approche « Constraint Satisfaction Problem/ ACV »
- L'approche EcoCSP.

Structure du mémoire

Ce mémoire de thèse est structuré comme une série de 4 articles scientifiques complétés de

chapitres introductifs et de conclusions.

Le premier chapitre présente le contexte général du travail en se concentrant sur la perspective de Développement Durable pour présenter l'écoconception. Le contexte de recherche et les contextes industriels sont alors explorés pour définir les problématiques de recherche.

Le chapitre 2 structure la démarche de recherche en présentant un état de l'art général, la méthodologie générale organisée en 4 axes et le champ d'application autour de deux programmes de recherche.

Le Chapitre 3 reprend un article scientifique publié en 2012 dans International Journal of Environmental Technology and Management. Cet article présente une application de la méthodologie ACV pour évaluer les performances d'un système remanufacturable. Cette étude de cas permet d'illustrer les multiples dimensions du remanufacturing.

Le Chapitre 4 reprend un article scientifique publié en 2009 dans *International Journal of Design Engineering*. Cet article propose une démarche afin d'identifier les axes d'amélioration les plus pertinents en combinant Analyse de cycle de vie et plans d'expériences.

Le Chapitre 5 reprend un article scientifique publié dans *Journal of Cleaner Production* en 2013. Cet article présente une approche adaptée aux systèmes complexes permettant la génération d'architectures en identifiant les meilleures associations de technologies par rapport aux contraintes de conception et des objectifs environnementaux.

Le chapitre 6 est constitué d'un article scientifique ayant été soumis à *International Journal of LCA* en 2013. Il présente une approche centrée sur la redéfinition des performances fonctionnelles.

Le Chapitre 7 propose une discussion générale de ces quatre axes de recherche, tandis que les conclusions et des perspectives sont présentées dans une dernière section.

Chapitre 1. Ecoconception et développement durable

Ce premier chapitre introduit les concepts généraux de la thèse. Le contexte général, centré sur la perspective de développement durable, est présenté pour introduire l'écoconception. Des considérations industrielles permettent alors de mettre en évidence des problèmes liés à la mise en œuvre des méthodes d'écoconception pour des systèmes mécaniques complexes.

1.1. Contexte Général

1.1.1. Développement durable/ Contexte de crise

Au cours du 20ième siècle la Terre a vu sa population passer de 1 milliard d'habitants à 6 milliards à la fin du deuxième millénaire. Les projections annoncent 10 Milliard d'habitants avant le milieu du siècle. 4 milliards d'habitants supplémentaires qu'il faudra loger, chauffer, éclairer alors que 925 millions de personnes souffrent toujours de la faim (FAO, 2010), que 783 millions n'ont pas accès à l'eau potable (UNICEF, 2012) et 1,3 milliards n'ont pas accès à l'électricité en 2012 (IEA, 2012) !

De plus en considérant l'amélioration du niveau de vie, l'augmentation des besoins énergétiques de la planète risque de conduire à un épuisement de plus en plus rapide des ressources de la Terre.

Les sociétés développées puisent dans les ressources naturelles de la planète un patrimoine (capital naturel) sans tenir compte du temps nécessaire à son renouvellement. Notre modèle économique est fondé sur une croissance induisant une augmentation constante de nos prélèvements dans le capital naturel sans considération de ce capital naturel.

Il reste, au rythme de consommation actuelle, 41 années de réserves prouvées de pétrole (Statistical Review of World Energy), 70 années de gaz (Gaz de France), 55 années d'uranium (Commission des communautés européennes, 2000). Même si ces chiffres peuvent être contestés, nous nous dirigeons vers une indisponibilité de la plus grande partie des ressources planétaires à brèves échéances si nous ne changeons pas radicalement de cap. Contrairement au 20ième siècle, nous consommons désormais plus de ressources que nous n'en découvrons de nouvelles. De plus, Il est prévu, d'ici à 20 ans, un doublement du parc automobile mondial ainsi qu'un doublement de la consommation énergétique mondiale. Enfin, plus nous approchons de l'épuisement des ressources, plus celles-ci sont difficilement extractibles. Plus que l'épuisement des ressources, le danger le plus visible est celui que nous faisons courir au climat, avec des évènements climatiques de plus en plus extrêmes.

Selon le World Wildlife Fund dans son rapport « planète vivant », 1986 a été l'année où le nombre d'humains vivants a atteint la limite de la capacité naturelle de la Terre. L'organisation poursuit en ajoutant que sauf changement de cap imminent, l'existence de deux planètes ne permettrait pas de répondre à nos besoins à l'horizon 2030 (WWF, 2012).

Les résultats inévitables seront, disent-ils, des océans vides de poissons à cause de la surpêche, des pâturages surexploités, des forêts détruites, des océans hautement pollués et une atmosphère surchauffée.

Les conséquences de l'exploitation des ressources Terrestre sont déjà visibles avec la multiplication des catastrophes écologiques liées à l'activité humaine (le marée noire suite au naufrage du pétrolier Erika en 1999, la marée noire dans le golfe du Mexique suite à l'explosion d'une plateforme pétrolière de BP en 2010, les catastrophes nucléaires de Tchernobyl 1986, et de Fukushima 2011 sans oublier les dégâts écologiques qui en résultent : pollution de l'air et de l'eau, disparitions des espèces animales et végétales, déforestation massive, désertification, multiplication des événements météo extrêmes...)

D'où ces questions fondamentales : Comment concilier progrès économique et social sans mettre en péril l'équilibre naturel de la planète ? Comment répartir les richesses entre les pays riches, ceux en développement et ceux moins développés ? Comment donner un minimum de richesses à ces millions d'hommes, de femmes et d'enfants encore démunis à l'heure où la planète semble déjà asphyxiée par le prélèvement effréné de ses ressources naturelles ? Et surtout, comment faire en sorte de léguer une terre en bonne santé à nos enfants ?

C'est pour apporter des réponses concrètes à ces questions qu'est né le concept de développement durable. Un concept que l'on résume aujourd'hui d'une simple phrase : "un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs" (Brudtland et al. 1987).

Pour y parvenir, les entreprises, les pouvoirs publics et la société civile devront travailler main dans la main afin de réconcilier trois mondes qui se sont longtemps ignorés : l'économie, l'écologie et le social. À long terme, il n'y aura pas de développement possible s'il n'est pas économiquement efficace, socialement équitable et écologiquement tolérable.

1.1.2. Vers une consommation raisonnée des ressources dans l'industrie

La production de biens et de services est au centre du développement des sociétés de consommation. Le concept de développement durable est critiqué par certains économistes car la notion de développement repose sur un objectif de croissance économique incompatible avec une planète fragile aux ressources limitées. La participation à un développement durable nécessite une modification de la production des produits pour éviter de puiser les matières premières dans le capital naturel. Tout le problème consiste à passer d'un modèle économique et social fondé sur l'expansion permanente à une civilisation « mesurée » dont le modèle économique a intégré la finitude de la planète. Pour effectuer une telle mutation, les pays riches devraient s'engager dans une réduction drastique de leur production et de leur consommation. En terme économique, cela signifie entrer dans une forme de « décroissance ». Le problème est que nos civilisations modernes, pour ne pas générer de conflits sociaux, semble s'imposer une croissance « perpétuelle ».

Il est urgent de définir et mettre en place un nouveau paradigme qui privilégiera une consommation raisonnée tout en maintenant une activité industrielle.

Afin d'atteindre un nouveau modèle basé sur une consommation plus raisonnée de nos ressources, il est nécessaire de réduire la consommation d'énergie « de stock » (c'est-à-dire les énergies fossiles) dont le taux de reconstitution est extrêmement faible en rapport à notre utilisation actuelle, qui sont de plus responsables de l'émission de gaz à effets de serre, et d'utiliser les énergies dites de « revenu » (c'est-à-dire les énergies renouvelables) : solaire, éolien, biomasse et hydraulique.

Dans l'industrie, le concept de développement durable doit conduire vers l'allongement de la vie en service des biens manufacturés, en mettant l'accent sur la reconception, le remanufacturing et le recyclage, autrement dit les étapes de la fabrication en circuit fermé. Le remanufacturing, qui consiste à retransformer les produits et les pièces usagés grâce à la mise en place de systèmes de retour au fabriquant, représente actuellement une économie d'environ 10,7 millions de barils de pétrole par an (**Steinhilper, 1998**). Le recyclage permet d'utiliser les produits dérivés des procédés de production et constitue une alternative de substitution aux matières premières. Le recyclage de matériaux tels que l'aluminium, par exemple, ne demande que 5% de l'énergie nécessaire à la production initiale. Le recyclage de la chaleur résiduelle de procédés à hautes températures tels que fours à coke, hauts fourneaux, fours électriques et fours à ciment constitue une opportunité à court terme importante et sous-exploitée principalement pour générer du courant à partir de la chaleur (par cogénération) (**UNEP, 2011**).

1.1.3. Comment concevoir des produits « durables »

Afin de concevoir des produits durables et plus respectueux de l'environnement de nouvelles règles de bonnes pratiques ont été mises en place : l'éco-conception ou l'intégration des aspects environnementaux en conception et le développement de produits a pour objectifs de réduire les impacts environnementaux qu'ils génèrent tout au long de leur cycle de vie (de la phase d'extraction des matériaux et fabrication à la fin de vie) tout en en préservant la qualité d'usage du produit ou en l'améliorant (AFNOR 05 X 30 U doc 524).

La dimension environnementale doit être intégrée dès les premières phases de la conception en faisant de celle-ci un paramètre de performance à part entière au même titre que d'autres préoccupations plus habituelles : attentes des clients, faisabilité technique, maîtrise des coûts, respect des délais ... :

« Ecodesign is "design which addresses all environmental impacts of a product throughout the complete life cycle of the product, without unduly compromising other criteria like function, quality, cost and appearance. » (ECO2-IRN, 1995).

Depuis le début des années soixante-dix, les domaines scientifique et industriel voient apparaitre une prolifération de démarches de conception qui visent à mieux prendre en compte les aspects environnementaux. La publication du Club de Rome « Limits to Growth » (Meadows et al., 1972) a sensibilisé le public sur la vulnérabilité et les ressources limitées de

notre environnement naturel. Mise en exergue par le choc pétrolier de 1974, la pénurie imminente de certaines matières ou l'explosion du nombre de déchets, la question du recyclage des produits, après leur durée de vie utile, a pris une importance majeure depuis la fin des années soixante-dix. Certains travaux pionniers (Weege, 1981) (Steinhilper, 1988) ont permis alors d'aboutir à des « guidelines » d'ingénierie pour des produits recyclables.

Dès lors, les activités de recherche se sont densifiées sur ce sujet et les travaux, depuis le milieu des années quatre-vingt-dix, se sont déplacés sur les aspects "Design for Disassembly". En effet, alors que les efforts se concentraient initialement autour de la conception de produits recyclables, des critiques concernant la relation entre le coût du recyclage et les bénéfices engendrés ont émergés, amenant donc à s'intéresser à un démontage moins coûteux (Kriwet, 1995).

En se basant sur les recherches précitées, Brezet résumait et définissait les différents niveaux d'éco-conception (Figure 1) en 1998 (Brezet, 1998) :

- Niveau 1 : Amélioration du produit
- Niveau 2 : Reconception du produit ou éco-reconception
- Niveau 3 : Innovation fonctionnelle
- Niveau 4 : Innovation des systèmes

Si l'amélioration des produits (niveau 1) implique de légères modifications et optimisations du produit existant, la reconception des produits (niveau 2) signifie que leurs composants sont en partie ou totalement développés ou remplacés par de nouvelles versions mieux conçues. Ces deux premiers niveaux se concentrent exclusivement sur les produits. L'innovation fonctionnelle (niveau 3) vise à compléter et jusqu'à remplacer les services proposés par les produits, et l'innovation des systèmes (niveau 4) signifie que de nouveaux produits et services émergeants nécessitent des modifications au niveau des infrastructures et organisations.

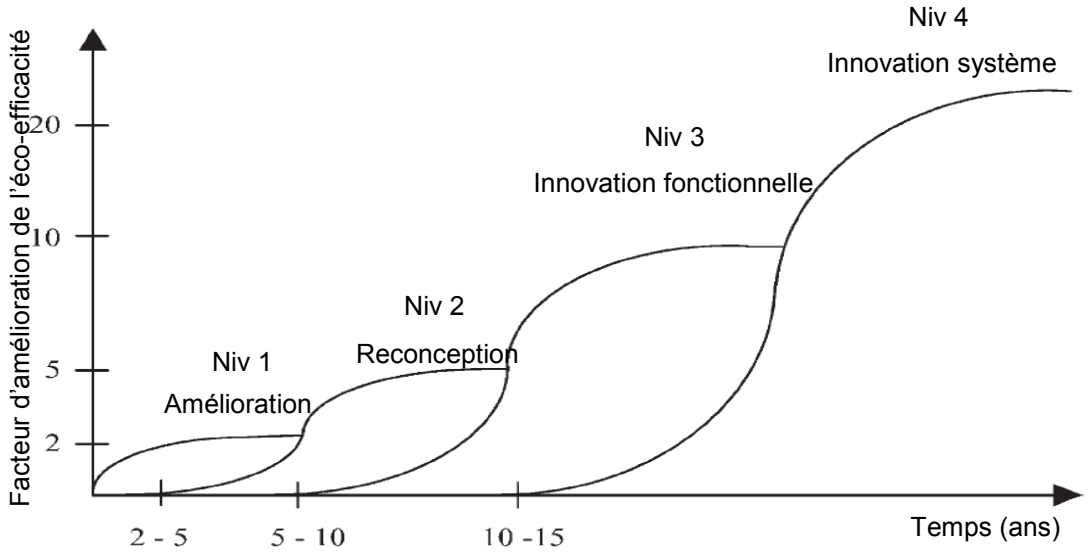


Figure 1 : Niveaux d'éco-conception et facteur d'amélioration de l'éco-efficacité (adapté de (Brezet, 1998))

Le facteur X de l'éco-efficacité est utilisé pour estimer les niveaux d'écoconception. Il découle de statistiques sur diverses activités permettant de réduire la quantité de ressources et d'énergie d'un processus.
Le terme d'éco-efficacité a été imaginé par le "*World Business Council for Sustainable development* (WBCSD)" en 1992 dans sa publication intitulée "*Changing Course*". Il est fondé sur l'idée de créer davantage de biens et de services tout en utilisant moins de ressources et en créant moins de déchets et de pollution. (Eco-efficiency, 2008).
Selon la définition de WBCSD, l'éco-efficacité est atteinte par l'obtention d'un produit ou d'un service compétitif sur le plan économique, qui satisfait les besoins humains et la qualité de vie, tout en réduisant les impacts écologiques et la consommation de ressources sur l'ensemble du cycle de vie à un niveau au moins compatible avec la capacité de régénération de la biosphère. Cela signifie en terme simple « faire mieux avec moins ». L'éco-efficacité est une mesure de la quantité de polluants et de ressources consommées par unité de produit ; augmenter les fonctionnalités d'un produit et/ou réduire les impacts environnementaux engendrés par un produit permet d'améliorer l'éco-efficacité d'un produit.

Le WBCSD a formulé les différentes stratégies qui permettent d'améliorer l'éco-efficacité :

- réduction de la consommation de matière ;
- réduction de la consommation d'énergie ;
- réduction des éléments toxiques ;
- augmentation de la recyclabilité ;
- augmenter l'utilisation durable de ressource renouvelable ;
- augmenter la durée d'utilisation ;
- augmenter le service rendu par le produit.

La réduction des impacts écologiques se traduit par une augmentation de la productivité des ressources, ce qui peut créer un avantage compétitif.

1.2. Contexte de recherche

1.2.1. Ecoconception et développement durable

Durand les dernières décades de nombreux outils et méthodes d'écoconception ont été élaborées. Ils ont été classifiés de différentes façons dans la littérature :

- distinction entre approches centrées sur le process (de type dépollution), celles qui se focalisent sur le produit et enfin les approches orientées "système" (qui considèrent le service rendu par le produit) (OTA, 1992).
- Distinction en fonction du 'thème' considéré : 'bouclage des flux de matières', 'énergétique', 'déchet', 'multicritère' (Horst, 1993).
- Distinction en fonction du degré de remise en cause des produits lors des projets de conception (facteur 1 à facteur 10) (Brezet, 1997) ou distinction en 4 niveaux de A.

Fet (Fet, 1997) : macro (niveau sociétal), méso (niveau industrie), micro-méso (niveau produit) et enfin micro (niveau procédé).

- Distinction en fonction de la nature des résultats obtenus : (Roll, 1998) organise pour sa part les outils selon trois axes. L'abscisse porte sur l'ampleur du cycle de vie considéré, l'ordonnée représente le niveau de décision obtenu et la dernière dimension rend compte du lieu d'intervention de l'outil dans le processus de conception.
- Distinction selon la fonction de l'outil au sein du processus de conception comme (Lepochat, 2007) ou (Janin, 2000) qui articule les outils en cinq catégories : les outils d'évaluation (qualitative et quantitative), les outils d'amélioration, les outils stratégiques, les outils de sensibilisation et les outils de communication ou comme l'équipe du projet DEEDS (Simon et al., 1998) qui caractérise les outils en fonction de leur "action principale" (*analyse, report, prioritise, improve*) et de leur période d'intervention durant le processus de conception.

Dans les catégories d'outils/méthodes d'amélioration ou de hiérarchisation environnementale, peu de supports méthodologiques existent et, parmi ceux-ci, encore moins nombreux sont ceux qui permettent une intervention tôt dans le processus de conception. Or ces outils d'amélioration sont les seuls qui permettent de contribuer à une stratégie radicale d'amélioration environnementale (factor X) et ainsi de dépasser les stratégies de :

- '*Green Fix*' qui consiste à supprimer ou à remplacer les matériaux identifiés impactant par une analyse de cycle de vie. Sans, toutefois, que cette modification ne vienne affecter la fonction principale du produit.
- ou '*Linear Down'* qui consiste à supprimer l'utilisation d'un matériau ou d'une substance impactante et de le remplacer par des matériaux plus respectueux ; mais cela à un cout : la fonction principale n'est plus assurée ou est dégradée

Ces stratégies, dénoncées par (Luttropp, 2005), conduisent généralement à des optimisations à court terme et temporaires. Luttropp privilégie une réduction des impacts environnementaux tout en rehaussant le niveau des performances dans une stratégie « Win-win » ou en éliminant les fonctions jugées superflues dans une stratégie « Unnecessary ». En effet, en permettant d'identifier les remèdes les plus prometteurs au bon moment dans le processus de conception, ces outils peuvent conduire l'équipe multidisciplinaire réunie en amont de la conception à concentrer son effort sur des pistes technologiques à fort potentiel tout en jouant sur les gains importants résultant d'une participation / modification de comportement de l'utilisateur.

1.2.2. L'Analyse de cycle de vie

Depuis le début des années soixante-dix, les domaines scientifique et industriel voient apparaitre une prolifération de démarches de conception qui visent à mieux prendre en compte les aspects environnementaux. Avec la prise de conscience écologique apparaissent de plus en plus de méthodes d'analyse et d'évaluation environnementale, des méthodes

variées, qualitatives (Evaluation Simplifiée et Qualitative du Cycle de Vie (ESQV), Matrice Matière Energie Toxicité (MET), Environmental Effect Analysis (EEA)) ou quantitatives (ACV, Material Intensity Per unit of Service (MIPS)), monocritère (MIPS, Bilan déchets) ou multicritères (ACV, ESQCV, MET), en amont (MIPS, ESQCV, MET) ou en aval (ACV), ciblées sur le produit ou le service, en mono phase (Bilan déchets) ou sur toutes les phases du cycle de vie.

Le développement d'un produit respectueux de l'environnement exige l'évaluation de ses impacts potentiels sur l'environnement dès les premières phases de sa conception, là où le potentiel d'optimisation du produit est élevé (Figure 2).

Nous allons ci-après présenter l'approche d'éco-conception basée sur l'Analyse de Cycle de Vie, ses objectifs, son contenu méthodologique ainsi que ses limites.

L'analyse du cycle de vie se base sur la notion de développement durable en fournissant un moyen efficace et systématique pour évaluer les impacts environnementaux d'un produit, d'un service ou d'un procédé.

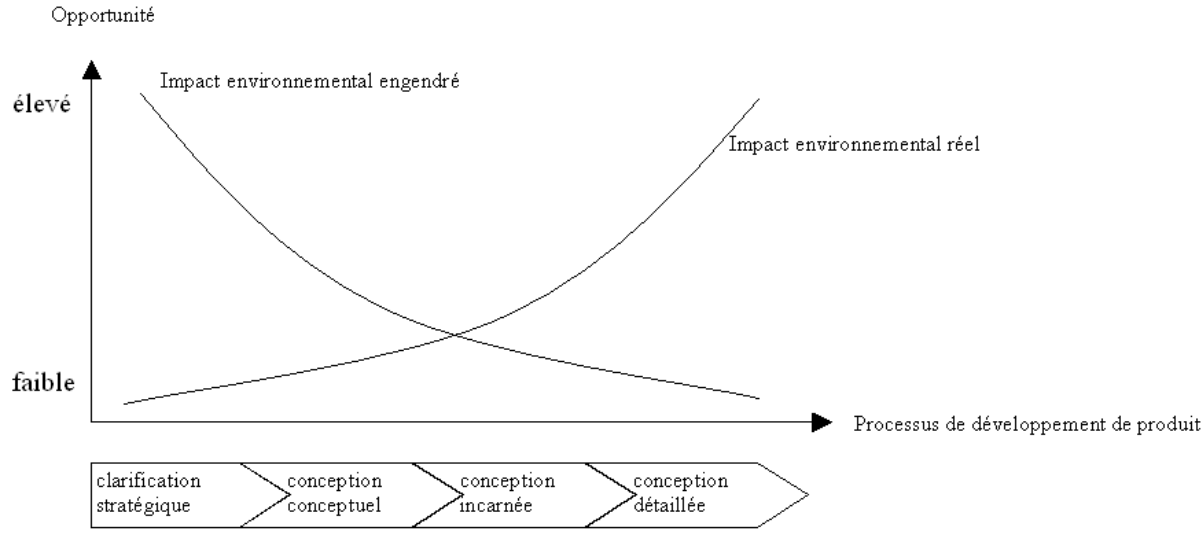


Figure 2 : Marge de liberté durant le processus de conception (d'après (Atik, 2001))

Le but fondamental, suivant la logique de pensée « cycle de vie », est de réduire la pression d'un produit sur les ressources et l'environnement tout au long de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières jusqu'à son traitement en fin de vie (mise en décharge, incinération, recyclage, etc.), cycle souvent qualifié de berceau au tombeau (« cradle to grave » en anglais). Un effet secondaire est qu'en limitant les besoins en ressources et en énergie, la chaîne de valeur du produit peut s'en trouver améliorée.

Cette méthode, apparue dans les années 70, intègre les méthodes couramment utilisées en gestion de l'environnement, notamment depuis sa normalisation avec la norme ISO 14040 (2006a) (qui s'insère dans la série des normes ISO 14000).

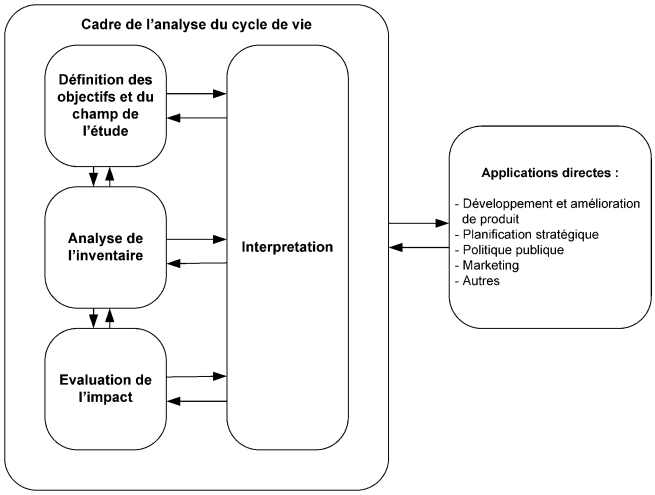


Figure 3 : Phases d'une analyse du cycle de vie (d'après Norme ISO 14040)

L'analyse du cycle de vie est à la fois :

- une procédure, c'est-à-dire une suite d'étapes standardisées,
- un modèle de transformations mathématiques permettant de transformer des flux en impacts environnementaux potentiels.

Conformément à l'ISO, la méthode ACV comporte en général (Figure 3) quatre étapes :

- définition des objectifs et du champ de l'étude,
- analyse de l'inventaire,
- évaluation des impacts sur l'environnement,
- interprétation des résultats et recherche d'amélioration.

Au cours de la conception d'un nouveau système, la méthode ACV peut être utilisée sur un produit existant ou de référence notamment en amont de la phase de spécifications. Les résultats renvoient aux concepteurs les informations suivantes : 1) les composants les plus impactants ; 2) les phases du cycle de vie les plus impactantes ; 3) la catégorie d'impact environnemental la plus importante. Ces résultats conduisent à élaborer des pistes d'amélioration ou de reconception du produit. Au cours de la conception, une ACV simplifiée pourra être réalisée avec des indicateurs sélectifs et des phases du cycle de vie simplifiées. Dès que toutes les informations sur le produit et son système ont été définies (à la fin de la conception détaillée), il est possible de procéder à une ACV du produit conçu (Figure 4).

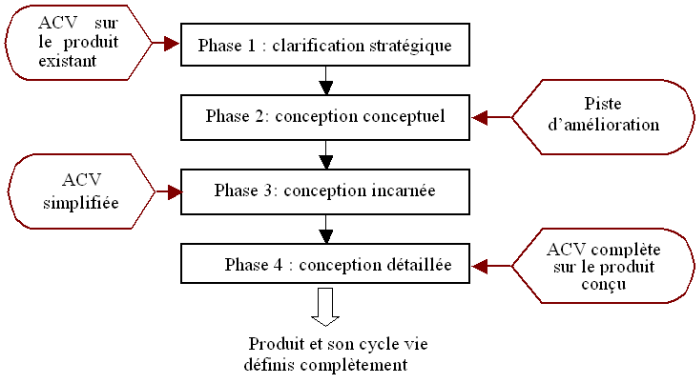


Figure 4 : Approche d'écoconception basée sur l'ACV

L'Analyse de Cycle de Vie, comme la plupart des méthodologies, contient ses propres limites. Nous énonçons ici les limites provenant de différents chercheurs, praticiens et usages.

Malgré le nom de cette méthode, il est important de comprendre que l'analyse du cycle de vie s'occupe d'étudier la fonction du produit. En effet, en n'étudiant que le produit en lui-même, il deviendrait difficile de comparer des produits remplissant la même fonction mais de manière différente comme la voiture et le transport en commun dont la fonction commune est de déplacer des personnes.

Par définition, l'Analyse du Cycle de Vie ne considère que les aspects environnementaux. En réalité, les aspects économiques, techniques et d'acceptation des clients ne peuvent pas être écartées dans toutes décisions (Krikke et al., 2003).

En outre, la complexité de l'ACV requiert la présence d'un expert ou un service de recherche spécialisé.

En raison de la nécessité de données détaillées, l'ACV ne peut être correctement utilisée que pour des produits définis complètement. En d'autres termes, il est impossible de l'exploiter dans les premières phases du processus de conception (Millet et al., 2007). Par conséquent, l'ACV est délicate à utiliser dans le cadre du développement de produits innovants.

Les effets environnementaux sont souvent différents suivant le contexte : un produit utilisant une énergie issue de l'hydro-électricité produite en Norvège a des impacts très différents de celui utilisant l'électricité produite par une station de lignite dans l'ex Allemagne de l'Est.

L'évaluation finale est généralement trop complexe et détaillée pour donner un sens à la plupart des décideurs du business (Fussler and James, 1996).

Pour la plupart des personnes qui utilisent l'ACV, et notamment en conception, il n'est pas envisageable pour des raisons pratiques de réaliser des études de terrain afin de construire sa propre base de données environnementale et ainsi diminuer l'incertitude. En effet le praticien utilise les enregistrements de la base de données environnementale au moment où il doit faire un choix dont il peut difficilement mesurer les conséquences, à moins d'explorer en profondeur les enregistrements de la base de données (Gehin, 2008).

L'ACV se concentre principalement sur les attributs physico-chimiques et écologiques, et n'a pas la capacité d'évaluer les compromis entre les solutions technologiques et les enjeux économiques et sociaux (Zhou and Schoenung, 2007).

Enfin, si les boucles en fin de vie du produit via la réutilisation, le remanufacturing et le recyclage sont un enjeu majeur pour améliorer les performances environnementales d'un produit, les approches ACV actuelles ont du mal à gérer les multiples cycles de vie des produits. Ainsi, *Bert* (Bert and Mark, 1999) considère que la compréhension véritable des bénéfices environnementaux dus à l'impact du remanufacturing est un domaine qui a besoin de plus d'efforts de recherche.

1.2.3. Conception de systèmes complexes

Concevoir un système complexe est difficile pour plusieurs raisons (Cilliers, 1998) :

1. Beaucoup de sous-systèmes et de solutions alternatives sont à considérer :

La conception de système complexe exige la prise en compte de la configuration du produit, c'est-à-dire déterminer les composants constitutifs de son architecture. Cette configuration demeure majoritairement figée pendant le cycle de vie de produit.

Pour les systèmes complexes, cette diversité des solutions mène rapidement à une vaste quantité de solutions combinatoires (Figure 1). Dans la conception navale, par exemple, les choix d'architectures et de propulsions sont des facteurs déterminants pour optimiser la consommation d'énergie et la performance du navire. Le type de coque affectera aussi des choix en termes d'architecture de propulsion en raison des contraintes appropriées. Le choix d'une ligne de propulsion (POD, Z-Drive ou ligne classique) aura un impact direct sur la manœuvrabilité de bateau et la consommation d'énergie associée, qui affectera à son tour la taille des batteries, le tirant d'eau, la trainée…et la performance de la ligne de propulsion.

2. Les sous-systèmes ont des interdépendances :

Aujourd'hui, pour beaucoup de systèmes complexes, la connaissance de chaque élément indépendamment des autres ne permet pas de prédire le comportement du système. En d'autres mots ce système devient de plus en plus complexe selon la définition de la complexité (Krob, 2009), (Bocquet et al., 2007), (Cilliers, 1998). Dans ce cas les approches analytiques linéaires ne permettent pas d'acquérir une vision suffisante du fonctionnement de tels systèmes. Une des principales raisons est que ces approches ne différencient pas les exigences et les conditions initiales d'un élément du système. D'autres approches sont ainsi nécessaires afin d'aller au-delà des optimisations locales qui sont actuellement utilisées, c'est-à-dire l'optimisation de chaque sous-système indépendamment. En effet l'optimisation totale du système peut nécessiter des sous-optimisations.

3. Un système complexe fait appel à différents modes de fonctionnement :

Un système complexe est soumis à des conditions d'utilisation ou des exigences exprimées par les parties prenantes : exploitants, clients, législateurs… En fonction des conditions

d'utilisation il est alors nécessaire de déterminer différents modes de fonctionnement. La consommation d'énergie dépend de l'utilisation qui est faite par le système. Dans le secteur automobile ces conditions d'utilisation sont matérialisées par des cycles NEDC (New European Driving Cycle) : Ces cycles sont composés de plusieurs cycles urbains (faible vitesse) et d'un cycle extra-urbain (grande vitesse). Le fait que les véhicules soient conçus pour un fonctionnement optimal sur un cycle d'utilisation urbain + extra-urbain ne rend pas compte de l'usage réel de l'utilisateur : majoritairement urbain ou plutôt extra-urbain. Ainsi ne serait-il pas plus judicieux de concevoir un système pour une utilisation spécifique au risque de dégrader les performances environnementales sur un segment peu utilisé.

4. Un système complexe évolue significativement tout au long de son cycle de vie :

Le cycle de vie d'un système complexe n'est pas facilement prévisible sur le long terme lors de la phase de conception, en particulier sa durée de vie, sa mise à niveau, son entretien et sa fin de vie.

La complexité résulte dans des cycles d'utilisation sur plusieurs niveaux associant phases d'utilisation et phases de maintenance. D'ailleurs l'exploitation du système peut varier selon beaucoup de critères (fréquentation, horaires de fonctionnement, de modes d'utilisation, des saisons, etc.). Par exemple un cycle annuel peut se composer de cycles saisonniers et de cycles quotidiens entrecoupé d'une période d'entretien. La longue vie de certains systèmes complexes implique des phases de maintenance avec un remplacement programmé (dès la conception) de certains composants. Au-delà d'un certain temps les caractéristiques des composants deviennent incertaines. Ces incertitudes impliquent une difficulté additionnelle pour prévoir le comportement du système dans le long terme.

5. Un système complexe interagit significativement avec son environnement :

Les systèmes complexes sont généralement des systèmes ouverts, c'est à dire qu'ils interagissent avec leur environnement. En fait, il est souvent difficile de définir les frontières d'un système complexe. Au lieu d'être une caractéristique du système, la portée du système est généralement déterminée par les objectifs de la description du système, et est donc souvent influencée par la position de l'observateur. (Cilliers, 1998)

1.3. Problématique

1.3.1. Ecoconception de systèmes complexes

Les approches d'écoconception traditionnelles et les outils d'évaluation de type ACV ne sont généralement pas adaptés aux systèmes complexes. La complexité générée par les systèmes complexes induit des questions en termes de modélisation, prédiction ou configuration. L'apport actuel des méthodes d'écoconception se limite à des optimisations très localisées (substitution de matériaux impactants par des matériaux plus « durables », ajout de sources d'énergie renouvelables, conception plus robuste, etc.). Cluzel (2012) définit

un système industriel complexe dans le sens d'écoconception comme :

- Un système à grande échelle en termes de sous-systèmes et composants, masse et utilisation de ressource,
- Un système dont le cycle de vie est difficilement prévisible dans le long terme, en phase de conception, en particulier sa durée de vie, les phases de mises à jour et de maintenance et la fin de vie,
- Un système dont les sous-systèmes peuvent avoir des cycles de vie différents et des temps d'obsolescence différents,
- Un système en interaction proche avec son environnement (super système, site géographique …),
- Un système géré par des décisions humaines.

1.3.2. Les limites de l'analyse de cycle de vie dans la prise en compte des multiples dimensions de la conception

Question de recherche 1 : Dans une démarche d'écoconception de systèmes complexes une identification le plus en amont dans le processus de conception des solutions favorables est importante. Les lignes directrices génériques (en écoconception) ne constituent pas un support suffisant pour les concepteurs dans ce domaine, tandis qu'une étude comparative détaillée basée sur des techniques ACV est trop exigeante en termes de compétences requises et de consommation du temps. La réalisation d'Analyse de cycle de vie exige une modélisation de tous les paramètres du système. Afin d'évaluer les incidences de chaque paramètre sur les multiples dimensions de la conception de produit, de nombreux scénarios doivent être évalués au détriment d'un travail d'interprétation et de recherche de voies d'amélioration.

1.3.3. Comment identifier et hiérarchiser les axes d'amélioration les plus prometteurs.

Question de recherche 2 : Les outils d'amélioration environnementale disponibles à l'heure actuelle ne permettent pas de répondre aux exigences d'un développement durable. En effet, les outils d'amélioration basés sur des simulations ACV ainsi que les guidelines/check-lists environnementales sont inadéquates pour aider l'équipe de conception à hiérarchiser les axes d'amélioration de façon rigoureuse, par une approche multidisciplinaire adaptée au travail de l'équipe de conception, par une multiplicité d'alternatives potentielles sur le plan environnemental et le plus en amont possible dans le processus de conception.

1.3.4. Comment déterminer les solutions technologiques adaptées à un système complexe tout en garantissant la meilleure performance environnementale ?

Question de recherche 3 : La conception d'un système complexe résulte de l'association de sous-systèmes, généralement interdépendants. L'approche intuitive associée à l'utilisation d'un logiciel d'analyse de cycle de vie ne permet pas d'appréhender toutes les associations de technologies possibles. Dans ces premières phases de conception le concepteur a besoin d'être soutenu par des outils adéquats capable de lui fournir les bonnes associations technologiques minorant l'empreinte écologique du système.

1.3.5. Quelles fonctionnalités pour des performances environnementales d'un système complexe optimales ?

Question de recherche 4 : D'après Lagerstedt et al. (2003), la majorité des outils d'écoconception, dont l'analyse de cycle de vie, est basée sur un seul critère : la fonction principale exprimée quantitativement, sous forme d'une unité fonctionnelle. L'unité fonctionnelle (UF) est « la performance quantifiée d'un système de produit destiné à être utilisée comme une unité de référence dans une ACV » (ISO 14044, 2006b). La définition de cette UF est critique, dans le cas où l'étude ACV a pour objectif d'analyser les impacts potentiels de différentes options ; il est impératif que toutes les options évaluées remplissent la même fonction pour pouvoir être comparées (Jolliet et al, 2005). Or en contraignant le concepteur à raisonner à iso-fonctionnalité, les méthodes ACV et dérivées freinent naturellement les réflexions qui porteraient sur des produits disposant d'un meilleur équilibre entre coût environnemental et gain fonctionnel (Lutropp, 2006). Cela signifie qu'il ne faut plus vérifier, à l'aide d'outils d'évaluation à posteriori, le produit dont l'UF a été défini pour ne pas trop polluer mais redéfinir le produit et les fonctions de façon à ce que leurs performances soient compatibles avec le développement durable.

1.3.6. Synthèse

La première question soulève le problème de la prise en compte de nombreux paramètres dans l'outil ACV pour concevoir un système remanufacturable. La deuxième question se focalise sur l'identification de voies d'amélioration pertinentes en amont de la conception). Tandis que les questions 3 et 4 portent sur l'écoconception de systèmes complexes, respectivement sur les aspects solutions technologiques et spécification fonctionnelles.

Ces 4 questions de recherche proposent de résoudre, à différents niveaux, des problèmes d'aide à la décision dans le but d'améliorer environnementalement les performances en conception de systèmes complexes. Ces questions sont traitées dans le chapitre suivant,

d'abord en effectuant une revue de la littérature sur les principales méthodes d'éco-conception, et d'autre part en proposant des méthodes et des outils adaptés à chacun des cas présentés.

Chapitre 2. Démarche de recherche

D'après le contexte et les questions de recherche formulées dans le chapitre précédent, un aperçu de la littérature dans les différents domaines de recherche concernés est proposé à la section 2.1, l'articulation générale du travail de recherche est présentée dans la section 2.2, les deux projets ayant servis de champs expérimentaux sont présentés à la section 2.3. Les quatre principales facettes de notre apport méthodologique sont traitées en détail dans le chapitre 3, chapitre 4, chapitre 5 et le chapitre 6 en tant qu'articles publiés (ou soumis) dans des revues internationales.

Le rôle de ce chapitre n'est pas de donner des informations détaillées ou des résultats, mais de structurer et lier de façon logique les domaines de la recherche et des axes traités dans les articles présentés dans les chapitres suivants.

2.1. Etat de l'art général

2.1.1. Les limites des outils d'écoconception pour l'amélioration environnementale des produits

Le premier axe de recherche concerne l'inadéquation des outils d'écoconception traditionnels à permettre une amélioration radicale des performances environnementales en conception de systèmes complexes. L'utilisation itérative de l'ACV permet une identification rigoureuse (ISO 14044) et justifiée des axes d'amélioration existants. Cependant comme l'a souligné Millet et al. (2005), cette approche mobilise trop de ressources pour comprendre les causes des impacts générés au détriment d'un travail d'interprétation et de recherche des voies d'amélioration (Fussler et James, 1996).

L'utilisation de Guidelines/ Check-lists permet d'identifier des axes d'amélioration spécifiques. Deux types de guidelines sont généralement distingués :

- Les guidelines génériques : ils sont qualitatifs (SEES, 2000) et donc peu applicables car jamais exactement adaptés à une situation nouvelle de conception (Luttrop, 2006)
- Les guidelines spécifiques sont plus précis, détaillés et nombreux générant une appréhension locale au détriment d'une vision plus spécifique.

Les outils d'amélioration disponibles ne permettent pas toujours de satisfaire les exigences du développement durable. En effet les simulations environnementales et outils simplifiés d'écoconception (guidelines, check-list…) ne permettent pas d'aider le concepteur à hiérarchiser de façon rigoureuse, par une approche multidisciplinaire adaptée au travail de l'équipe de conception, une multiplicité d'alternatives potentielles sur le plan environnemental et le plus en amont possible du processus de conception.

2.1.2. Le cahier des charges d'une méthodologie

d'écoconception de systèmes complexes

Le troisième axe de recherche, traité dans l'article 3, propose de définir une approche de conception adaptée aux systèmes complexes. Après avoir identifié les limites des outils existants un cahier des charges répondant à ces limites a été élaboré. Un outil d'écoconception de systèmes et plus spécifiquement de systèmes complexes doit :

- Etre peu consommateur de ressources et de temps.
- Etre facilement appropriable par le concepteur.
- Etre rigoureux.
- Avoir (permettre) des résultats facilement interprétables.
- Permettre d'explorer le champ du possible.
- Etre facilement ré-exploitable.

Parmi les principaux freins à la diffusion des outils d'écoconception le temps de mise en œuvre, l'apprentissage et l'assimilation de l'outil par le concepteur (Karlsson and Luttropp (2006), Baumann et al. (2002) et Ernzer and Birkhofer (2005)). Utilisés par des spécialistes (lenox et al., 1996) les outils d'écoconception ne sont pas efficacement exploités tout au long du cycle de développement de produit (Lindhal, 2006). L'appropriation des outils d'écoconception passe par une amplification de l'étape de modélisation du produit (Adriankaja, 2012). Pour traiter les nombreuses solutions technologiques il est indispensable de multiplier les voies à investiguer. C'est à travers la multiplication de ces pistes qu'un résultat robuste, dans le sens où il n'entraine que des contradictions non-significatives, peut être obtenu. Comme le souligne Dierneder et Schield (1998), l'intérêt des outils d'aide à la conception est « to compare a higher number of different promising solution first enough ». La dernière exigence requise est de permettre la ré-exploitation des résultats d'études antérieures. En capitalisant les expériences, les règles de conception et en alimentant les bases de données des composants et les modèles, le temps de mise en application de la méthodologie est réduit et le risque d'erreurs limité : « It is easier to follow a signed road than to walk in the dark » (Lindahl, 2006).

2.1.3. Remise en cause des fonctionnalités dans le cadre d'une démarche d'écoconception innovante

Le dernier axe de recherche, traité dans l'article 4, propose de remettre en cause les spécificités autour des performances fonctionnelles. En effet comme le souligne Lagerstedt (2003) la performance environnementale dépend grandement des fonctionnalités d'un produit. Mais d'un autre côté, le succès commercial du produit est dépendant des fonctions proposées aux utilisateurs. Lagerstedt (2003) parle d'équilibre à trouver entre « cout environnemental » et « gain fonctionnel ». Les méthodes d'écoconception actuelles telles que l'analyse de cycle de vie et autres méthodes d'évaluation dérivées, les guidelines et checklists environnementales se contentent d'identifier les causes de problèmes environnementaux afin de reconcevoir le produit tout en gardant ses fonctionnalités

inchangées ceci en contradiction avec les stratégies d'amélioration environnementale radicale (factor X) qui nécessitent une remise en cause des fonctionnalités du produit. Généralement les méthodes d'évaluation, comme l'ACV, sont basées sur une seule référence : la fonction principale exprimée sous forme d'une unité fonctionnelle. L'ISO 14044 définit l'Unité Fonctionnelle (UF) comme la « performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une analyse du cycle de vie » (ISO 14044, 2006b). Il est impératif que toutes les options évaluées remplissent la même fonction pour pouvoir être comparées (Jolliet et al., 2005). Or les systèmes, notamment les systèmes complexes, se réduisent rarement à une formulation fonctionnelle simple. Une étude bibliographique réalisée sur de nombreux systèmes de transport montre que l'unité fonctionnelle est très souvent rapportée à une fonction principale qui est celle de transporter une personne ou un objet d'un point A à un point B distant de x milliers de km. Or, les véhicules sont des systèmes complexes qui possèdent des sous-fonctions qui doivent être prises en compte lors de la comparaison entre deux systèmes (par exemple une voiture utilitaire et une berline).

2.2. Méthodologie générale

2.2.1. Présentation générale

Les travaux effectués nous ont amenés à développer 4 approches méthodologiques permettant à chaque fois d'apporter des réponses aux aspects problématiques identifiés dans le chapitre précédent. Chaque axe est développé dans un article de revue scientifique et reproduit respectivement dans les chapitres 3, 4, 5 et 6 du mémoire. La première approche méthodologique mise en œuvre dans le cadre du projet MacPMR consiste à appliquer itérativement l'ACV afin d'évaluer différents scénarios de remanufacturing et d'identifier le bon scénario d'Upgrade, la bonne décomposition « Modulaire » et la bonne structure logistique du produit d'un point de vue environnemental. La deuxième approche appliquée durant les deux projets consiste à associer une approche Plan d'expérience à la méthode d'Analyse de cycle de vie appliquée d'abord à un produit simple (une machine à café) puis à un système complexe (un modèle simplifié de navette maritime à passagers). Enfin en analysant les forces et les faiblesses des approches précédentes nous avons proposé une démarche reposant sur l'utilisation de la méthode de résolution des problèmes par satisfaction de contraintes combinée à l'analyse de cycle de vie. Cette démarche a été mise en pratique pour générer et pré-dimensionner des architectures optimales en fonctions d'objectifs environnementaux dans le cadre de la conception d'une navette maritime à passagers. Nous avons ensuite proposé une évolution, appelée ecoCSP, qui en plus d'identifier les architectures optimales sur le plan environnemental permet de faire varier les spécifications fonctionnelles.

2.2.2. Axe 1 : Approche Intuitive (Pareto/ ACV)

La première approche que nous avons considéré dans le cadre de ce travail de recherche est une approche qualifiée de « Pareto/ ACV ». L'approche « Pareto »/ ACV consiste en une optimisation intuitive des systèmes ou sous-systèmes apparaissant comme les plus impactants. Selon la loi empirique de Pareto, environ 80 % des effets sont le produit de 20 % des causes, en se focalisant sur ces 20% du système le concepteur peut espérer une réduction importante des impacts environnementaux. Dans cette approche le concepteur prend appui sur sa compréhension implicite du système. Ce raisonnement intuitif consiste à optimiser par tâtonnement les éléments des principaux sous-systèmes afin d'améliorer globalement les performances du système. Mis en application dans le cadre de la conception de produits remanufacturables, cela se traduit par la modélisation de scénarios correspondant à la variation des paramètres : nombres de modules remanufacturés, nombre de cycles de remanufacturing, durée entre chaque cycle, localisation du/ des centres de remanufacturing. Dans la pratique cela conduit à devoir évaluer de nombreux scénarios.

Autre champs d'étude, dans le domaine des transports les critères d'optimisation sont la masse du système, les modes de fonctionnement et les critères économiques et environnementaux. Après identification des sources d'impacts majeures et d'une recherche de solutions alternatives, il est alors nécessaire de réitérer des analyses de cycle de vie. A chaque itération l'objectif est d'affiner la définition du nouveau système et de réduire les impacts du système sur le cycle de vie.

Cette approche, très « naturelle », est toutefois très consommatrice de temps car chaque solution alternative doit être évaluée par une ACV.

Cette approche méthodologique reproduite dans le chapitre 3 a fait l'objet d'une publication :

Tchertchian N., Millet D., El Korchi A., 2012, "Design for Remanufacturing: What performances can be expected?", International Journal of Environmental Technology and Management, 2012 Vol.15, No.1, pp. 28 – 49

2.2.3. Axe 2 : Approche Plans d'expérience/ ACV

L'état de l'art traduit un manque de supports méthodologiques qui permettraient aux équipes de conception d'organiser les différents axes d'amélioration/ innovation hiérarchiquement le plus tôt possible dans la phase de conception. Cela permettrait au concepteur d'identifier les améliorations ou innovations qui pourraient présenter le plus fort taux d'amélioration des performances environnementales. La solution proposée consiste à mettre en place un modèle de produit comprenant les principaux paramètres de conception relatifs à la performance environnementale.

Un plan d'expérience à 3 niveaux met en lumière la contribution de chaque paramètre sur la performance environnementale globale (évaluée, dans un premier temps à l'aide de la méthode end-score EI99). Pour chaque niveau expérimental une évaluation de la faisabilité technico-économique et de la satisfaction (sur une échelle de 1 à 10) est proposée. Le livrable de cet outil permet de hiérarchiser chaque axe d'amélioration par l'évaluation du taux d'amélioration environnemental. Le taux d'amélioration est accompagné d'une évaluation de la faisabilité technico-économique et de l'attractivité pour l'utilisateur. Ces informations aident

l'équipe de conception à faire des choix réalistes pour l'entreprise (en tenant compte du budget), acceptables par l'utilisateur (compte tenu de ce que l'utilisateur est prêt à faire ou à accepter) et bon sur le plan environnemental.

Cette approche méthodologique reproduite dans le chapitre 4 a fait l'objet d'une publication :

Tchertchian N., Millet D., Brissaud D., 2009, "How to identify the most promising areas of environmental improvement at the early stage of the design process?", International Journal of Design Engineering, 2009 Vol.2, No.3, pp. 299 – 319

2.2.4. Axe 3 : Approche CSP/ ACV

L'état de l'art met en évidence l'inexistence d'outils d'écoconception pour les phases amont de la conception de produits, particulièrement dans le domaine des systèmes complexes. Un système complexe possède de nombreux sous-systèmes interdépendants, plusieurs alternatives de conception pour chaque sous-système, des conditions d'utilisation variables affectant le choix des solutions technologiques et des performances environnementales ; c'est en outre un système qui évolue tout au long du cycle de vie et en interaction avec l'environnement extérieur. Ces caractéristiques mènent rapidement à un grand nombre de configurations à évaluer pour identifier le système optimal sur le plan de l'environnement (de façon multicritère et sur l'ensemble du cycle de vie). L'approche méthodologique CSP/ ACV combine les méthodes d'Analyse de cycle de vie (ACV) et de résolution de problèmes par satisfaction de contraintes (CSP). La combinaison de ces deux méthodes permet de générer des architectures de systèmes complexes en identifiant les associations technologiques qui satisfassent les objectifs environnementaux. Les résultats obtenus par chacune des 3 démarches (Pareto/ ACV, DoE/ ACV et CSP/ ACV) sont évalués selon différents critères : temps d'utilisation, de formation, d'exploration du champ du possible, d'interprétabilité des résultats et de ré exploitabilité. Les résultats font apparaître que la démarche CSP/ ACV présente des avantages en particulier sur les critères d'exploration du champ du possible, d'interprétation des résultats et sur le gain de temps permis par la ré exploitation des résultats obtenus sur des systèmes proches.

Cette approche méthodologique reproduite dans le chapitre 5 a fait l'objet d'une publication :

Tchertchian, N., Yvars, P. A., Millet, D., 2013. Benefits and limits of a CSP/LCA approach for the ecodesign of complex systems. A case applied to a hybrid passenger. Journal of Cleaner Production, 2013 Vol. 42, No. 1, pp. 1 – 18

2.2.5. Axe 4 : Approche EcoCSP, extension de l'approche CSP/ ACV

La croissance démographique mondiale, le développement économique des pays émergents, l'homogénéisation d'un mode de développement à l'image des pays occidentaux rend de plus en plus urgent un développement durable. Pour atteindre un tel développement il ne suffit plus de réduire superficiellement les impacts générés par l'activité humaine ; il est nécessaire

de redéfinir complètement le produit et les performances attendues de façon à ce que leurs conséquences soit compatibles avec le développement durable. Dans le domaine de la conception de produits cela signifie qu'il faut inverser l'approche en définissant parmi les différentes définitions fonctionnelles qui peuvent être faites du produit ou systèmes considérés qu'elles sont celles qui présentent les meilleures performances environnementales. L'objet de cet article est de présenter une approche, basée sur la combinaison des méthodes d'analyse de cycle de vie (ACV) et de résolution de problèmes par satisfaction de contraintes (CSP), capable de résoudre le problème de la définition de l'unité fonctionnelle en générant une architecture optimisée et d'associer des spécifications fonctionnelles négociées. L'approche, appelée ecoCSP, permet d'aider à la spécification des performances négociables (Functional Requirement Negotiable) afin de tendre vers un optimum environnemental. L'approche ecoCSP est déployée afin de définir les performances fonctionnelles d'une navette maritime à passagers écologique sur son cycle de vie.

Cette approche méthodologique, présentée dans le chapitre 6, a fait l'objet d'une soumission dans la revue IJLCA.

Tchertchian, N., Millet, D., Yvars, P. A., 2012. The influence of the level of definition of functional specifications on the environmental performances of a complex system. The EcoCSP approach. Int Journal of Life cycle Assessment (En cours de soumission)

2.3. Champs expérimentaux mobilisés

Le développement des approches méthodologiques, introduites dans la section précédente, a été initié par le biais de deux programmes de recherche indépendants. Le premier programme de recherche, MACPMR, consistait à développer une méthodologie de conception pour des produits mécatroniques remanufacturables. Le deuxième programme de recherche, baptisé DEESSE, a eu pour ambition de développer une navette maritime hybride « Diesel/ Electrique » Eco-compatible. A travers la conception de ce système mécanique complexe, l'objectif était de proposer une méthodologie d'écoconception alternative aux méthodes existantes, non adaptées aux produits/ systèmes complexes.

2.3.1. Méthode d'Aide à la Conception de Produits Mécatroniques Remanufacturables (MacPMR)

Partenaires académiques :

SUPMECA - Laboratoire LISMMA (Pilote) *D. Millet – N. Tchertchian – O. Pialot*	
INPG Laboratoire G-SCOP *D. Brissaud – P. Zwollinski*	
Université AIX – MARSEILLE – Laboratoire CRET LOG *J. Collin – A. El Korchi*	
Université TU Braunschweig – IWF *C. Hermann – T. Luger*	

Partenaire Industriel :

Neopost Industrie *G. Moenne Loccoz*	

Budget Global : 320k€

Projet financé par :

L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) A hauteur de 88k€	La Fondation CETIM (**C**entre **TE**chnique des **I**ndustries **M**écaniques) A hauteur de 200k€

Durée : 30/09/2008 au 30/09/2010

Description :

Les résultats de ce programme de recherche sont constitués par une méthode MacPMR structurée en 6 étapes. La première étape a pour objectif de délimiter les besoins en informations d'un projet de conception visant à développer un système remanufacturable. Nous proposons pour ce faire une analyse multi-dimensionnelle permettant à une équipe multidisciplinaire au sein de l'entreprise d'identifier les problèmes du remanufacturing, de caractériser les solutions pour y remédier afin de définir le niveau de changement nécessaire pour rendre viable le remanufacturing pour l'entreprise considérée. La deuxième étape vise à

élaborer une liste de Scénarios d'Upgrade, avec notamment la définition du nombre de cycles, leur durée et les évolutions fonctionnelles à intégrer au cours de ces cycles. La troisième étape a pour objectif de développer une liste d'Architectures de Produit potentielles permettant d'aider les concepteurs à faire les meilleurs regroupements modulaires en vue du remanufacturing ; ces regroupements modulaires sont basés sur un calcul d'affinité des différents modules sur les critères de fiabilité, d'obsolescence et de commonalité. La quatrième étape aide l'équipe de conception à établir une liste de structures de Reverse supply-chain potentielles en s'appuyant sur une liste de 18 Structures Génériques de RSC. La cinquième étape vise à associer les meilleures architectures de produits avec les meilleures structures de reverse supply chains et les meilleurs Scénarios d'Upgrade pour former des concepts (Product architecture+RSC Structure+ Upgrade scenario) potentiels. Enfin la dernière étape concerne l'évaluation multicritères (environnementale, économique et sociale) de ces concepts potentiels pour sélectionner les concepts viables. Cette méthode MacPMR est supportée par 4 outils assistant l'équipe multidisciplinaire de conception dans les taches les plus délicates d'un projet de conception en vue du remanufacturing : l'outil 1 « Changes Strategy Advisor », l'outil 2 « Life Cycles Explorer », l'outil 3 « Modular Grouping Explorer » et l'outil 4 « RSC Structure Explorer ».
Nous sommes intervenus dans ce projet essentiellement sur l'outil 3.

2.3.2. Diesel Electro Engine Ship System Eco-compatible (DEESSE)

Partenaire académique :

SUPMECA - Laboratoire LISMMA *D. Millet – N. Tchertchian – P. A. Yvars*	

Partenaire Industriel

STR Europe (Anciennement Mettle) *C. Biancardi – M. Labrosse*	
ECA Robotics *G. Falcou – P. Peras*	
Société Internationale des Moteurs Baudouin S. Guglielmo – J.P. Buchaillet	

Projet labélisé par

Pôle Mer PACA	

Budget Global : 3 500k€ dont 1 200k€ de subvention.

Projet subventionné, lors du 5ème appel à projets, par le Fonds Unique Interministériel (FUI) en soutien aux projets de recherche et développement collaboratifs des pôles de compétitivité

La Direction Générale de la compétitivité de l'industrie et des services	Toulon Provence Méditerranée
La région Provence-Alpes-Côte d'Azur	Le conseil général des Alpes-Maritimes

Durée : 1/12/2009 au 30/11/2012

Description :

Le projet DEESSE a permis de développer une technologie innovante par couplage diesel/électrique à la fois dans le but de diminuer les coûts opérationnels mais également en favorisant l'essor des transports écologiques urbains sur l'eau. Un bateau hybride conciliant performances et écologie constitue ainsi un concept très pertinent car il permet d'offrir une technologie navale alternative et efficace, non seulement aux collectivités locales, mais aussi aux opérateurs désirant mettre en place des services de « mobilité verte », tout en maintenant un niveau de performances approprié. Pour ce faire, une approche CSP a été mise en œuvre afin d'identifier la configuration d'utilisation et l'architecture de navette les plus performantes sur des cibles économique (CTA - coût total d'acquisition) et environnementale (impact environnemental global sur l'ensemble du cycle de vie).

Les chapitres suivants sont les reproductions d'articles originaux publiés ou soumis à des revues internationales. Ils détaillent les approches méthodologiques et les applications proposées dans le chapitre en cours.

Chapitre 3. Paper #1:

Design for Remanufacturing: What performances can be expected?

This paper has been published in *International Journal of Environmental Technology and Management* in 2012, under the following reference:

Tchertchian N., Millet D., El Korchi A., 2012, "Design for Remanufacturing: What performances can be expected?", International Journal of Environmental Technology and Management, 2012 Vol.15, No.1, pp.28 – 49
http://dx.doi.org/10.1504/IJETM.2012.045151

Abstract: The objective of this report is to supply first of all a state of the art on the consideration of the remanufacturing on one hand in the ecodesign methods and on the other hand in the reverse supply chain management (RSC). These states of the art show that the available methods of ecodesign take into account little the potentialities of the remanufacturing notably because of the difficulty considering products with multiple life cycles (notion of upgradability). They show on the other hand that the RSC management and the ecodesign methods are considered rarely simultaneously. A case study conducted on an espresso machine completes these states of the art to accentuate the various dimensions of the remanufacturing problem. All these elements reveal the necessity of giving to the design team, a method helping to develop new concepts of remanufacturable systems.

Key words: Eco-Design, Remanufacturing, LCA, Economic Assessment, DfX, RSC

Chapitre 4. Paper #2:

How to identify the most promising areas of environmental improvement at the early stage of the design process?

This paper has been published in *International Journal of Design Engineering* in 2009, under the following reference:

Tchertchian N., Millet D., Brissaud D., 2009, "How to identify the most promising areas of environmental improvement at the early stage of the design process?", International Journal of Design Engineering, 2009 Vol.2, No.3, pp. 299 – 319
http://dx.doi.org/10.1504/IJDE.2009.030177

Abstract: This article corresponds to a lack of methodological supports in the literature which would enable design teams to organise various areas of improvement/innovation hierarchically as early as possible in the design stage. This would enable the team to identify the improvements or innovations which potentially present the highest rate of environmental improvement. The proposed solution consists of setting up a product model comprising the main design parameters relating to environmental performance. A three tiered design of experiments sheds light on the contribution of each parameter to the global environmental performance (evaluated in this instance by the end-score of the EI99 method). Each experimental level also contains a level of technico-economic feasibility (graded on a scale from 1 to 10) and a level of attractiveness for the user (graded on a scale from 1 – 10). The final deliverable of this tool constitutes the evaluation of the rate of environmental improvement for each type of improvement. This is supplemented by its level of technico-economic feasibility and level of user attractiveness. With this information, the design team is better able to make choices corresponding to what seems most feasible for the company (considering the budget), most acceptable for the user (considering what the user is prepared to do or to accept), and best for the environment.

Key words: Eco-Design, Innovation, Improvement tool, Guideline,

Chapitre 5. Paper #3:

Benefits and limits of a CSP/LCA approach for the ecodesign of complex systems. A case applied to a hybrid passenger ferry

This paper has been published in *Journal of Cleaner Production* in 2012, under the following reference:

Tchertchian, N., Yvars, P. A., Millet, D., 2013. Benefits and limits of a CSP/LCA approach for the ecodesign of complex systems. A case applied to a hybrid passenger. Journal of Cleaner Production, 2013 Vol. 42, No. 1, pp.1 – 18
http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.048

Abstract: This article aims to respond to the absence of ecodesign tools for products in the early stages of the design process especially in the domain of complex systems. A complex system has numerous interdependent sub-systems, each of these having several design alternatives and variable conditions of use which affect the choice of technological solutions and environmental performance. A complex system is also one which evolves throughout its life cycle, interacting with the external environment. These characteristics rapidly result in a great number of configurations which must be assessed in order to identify the optimal system for the environment (using many criteria and over the whole of the life cycle). To ecodesign such a system in the early stages of the design process, we have investigated, from the literature, 3 different methodological approaches, each of which uses LCA (Life Cycle Assessment). Approach 1 is the intuitive approach of the designer based on simple rules or on a Pareto combined with LCA. Approach 2 is based on designs of experiments combined with LCA and in approach 3, problem solving algorithms based on the calculation of intervals are combined with the LCA. These three methods (Pareto/ LCA, design of experiment/ LCA and CSP/ LCA) have been tested in an ecodesign project for a complex system: a hybrid passenger ferry. The results of each method are evaluated according to the following criteria: time consumed, training, exploration of fields of possibility, interpretation of results and reusability. These results show that the CSP/ LCA approach has certain advantages, in particular for exploring the fields of possibilities, interpreting results and the time saving through reusing results obtained for similar systems.

Keywords: Ecodesign; Complex system; Life Cycle Assessment; Constraint Satisfaction Problem; Ship design.

Chapitre 6. Paper #4

Influence du niveau de définition des spécifications fonctionnelles sur les performances environnementales d'un système complexe - Approche EcoCSP

This paper has been submitted in *International Journal of LCA* in 2012, under the following reference:

Tchertchian N., Millet D., Yvars P. A., 2012, "The influence of the level of definition of functional specifications on the environmental performances of a complex system. The EcoCSP approach ", International Journal of LCA, Submitted in 2013

Abstract:

Abstract :

Purpose L'homogénéisation d'un mode de développement à l'image des pays occidentaux rend de plus en plus urgent un développement durable. Pour atteindre un tel développement la réduction superficielle des impacts environnementaux n'est pas suffisante; il est nécessaire de redéfinir en profondeur le produit et les performances attendues de façon à ce que leurs conséquences soient compatibles avec le développement durable. Dans le domaine de la conception de produits cela signifie qu'il ne suffit plus de vérifier, à l'aide d'outils d'évaluation à postériori, le produit dont l'unité fonctionnelle a été définie à priori mais bien de redéfinir cette dernière.

Methods L'objet de cet article est de présenter une approche, basée sur la combinaison des méthodes d'analyse de cycle de vie (ACV) et de résolution de problèmes par satisfaction de contraintes (CSP). Cette approche originale permet de faire varier en conception les différentes dimensions de l'UF d'un système complexe et ainsi favoriser l'identification de la meilleure architecture associée à la meilleure définition fonctionnelle du système. En effet l'ACV impose aujourd'hui d'avoir une unité fonctionnelle figée et donc de devoir attendre la fin du processus de conception pour évaluer le système. L'approche ecoCSP, présentée ici, permet la spécification des performances négociables (Functional Requirement Negotiable) afin de tendre vers un optimum environnemental correspondant à un cahier des charges acceptables. L'approche ecoCSP est appliquée ici pour définir les performances fonctionnelles d'une navette maritime écologique à passagers sur les phases d'extraction/ fabrication, utilisation et maintenance (la fin de vie n'est pas traitée pour simplifier l'étude).

Results and discussions L'application de l'approche EcoCSP sur la conception d'une navette maritime à passagers a permis d'identifier les fonctions négociables significatives. La vitesse, le nombre de passagers transportés et le confort sont des fonctions négociables significatives. En faisant varier localement une fonction négociable du système, une unité fonctionnelle localement optimisée (FU_{lo}) est obtenue. Par exemple en réduisant la vitesse maximale de 4,2% et en allongeant la durée du trajet de 3% le gain environnemental obtenu atteint 9%. En spécifiant le niveau de performances de plusieurs fonctions négociables du système le gain environnemental maximal atteint 13%, l'unité fonctionnelle correspondante et globalement optimisée (FU_{go}) est obtenue. La difficulté du problème réside en ce que l'intensité des gains varie en fonction de l'exhaustivité des alternatives technologiques disponibles autour du point de fonctionnement optimal.

Conclusions La complexité des couplages entre sous-systèmes et la multitude de sous-systèmes obligent le concepteur à utiliser des outils « intelligents » qui tout en simulant de nombreux scénarios l'aide à effectuer les bons réglages et choix technologiques au regard des bonnes spécifications fonctionnelles. La méthode ecoCSP permet d'appréhender le problème de la configuration de l'architecture produit simultanément avec e problème de la définition des exigences fonctionnelles. Toutefois la modification, même marginale, des exigences fonctionnelles du système peut entrainer de nouvelles contraintes sociales, économiques et environnementales ; en parallèle une réflexion sur ces conséquences doit être menée pour éviter un déséquilibre entre les 3 piliers du développement durable.

Keywords: Life cycle assessment ; Constraint satisfaction problem ; Ecodesign ; Complex system ; ship design ; sustainable development

Chapitre 7. Discussion générale

Nous avons mis en œuvre différentes approches méthodologiques pour l'amélioration environnementale en conception. Ces différentes approches sont adaptées à différents champs d'application :

Les 4 articles scientifiques mettent en action 4 approches méthodologiques pour l'amélioration en conception.

Nous proposons une discussion pour classifier les différentes approches selon les critères de caractérisation du cahier des charges pour une méthode d'écoconception de systèmes complexes :

- Etre peu consommateur de ressources et de temps
- Etre facilement appropriable par le concepteur
- Etre rigoureux
- Avoir (permettre) des résultats facilement interprétables
- Permettre d'explorer le champ du possible
- Etre facilement ré-exploitable

Les 3 approches X/ ACV, sont relativement lourdes à mettre en place.

L'approche Pareto/ ACV, bien que focalisée sur les principaux contributeurs d'impacts (Processus et composant), est une approche optimisante (d'optimisation) fastidieuse car elle implique de réaliser plusieurs ACV itérativement pour chaque alternative identifiée. L'approche DoE/ ACV réclame un pré-travail de modélisation puis d'évaluations qui peuvent conduire à des voies sans issues (correspondant à des associations technologiques incompatibles). L'approche CSP/ ACV comprend une phase modélisation du système longue et fastidieuse en fonction de la complexité. La phase d'utilisation et d'identification est plus simple car automatisée.

Formation & Assimilation

Dans les 3 approches méthodologiques X/ ACV, l'utilisation de l'analyse de cycle de vie comme outil d'évaluation environnementale nécessite de respecter un cadre méthodologique définit par la norme ISO14040. Ce cadre très strict requiert la compétence d'un spécialiste dans le domaine.

L'expertise des concepteurs du système rend l'utilisation Pareto/ ACV particulièrement intuitive. L'approche DoE/ ACV exige une maitrise des matrices d'expériences qui peuvent être supplées par un support logiciel. L'approche CSP/ ACV est la plus complexe à mettre en place car elle est basée sur l'utilisation d'outils numériques (CSP, algorithmes génétiques et autres outils) qui sont des outils d'informaticiens et généralement mal adaptés au langage des concepteurs de produits.

Rigueur des résultats

L'approche Pareto/ ACV repose sur l'utilisation de règles générales, de connaissances en conception basées sur des règles empiriques. Sur des systèmes complexes, avec des sous-systèmes interconnectés ces règles empiriques sont souvent invérifiables. Ce sont ces sommes d'approximations qui engendrent un manque de qualité dans les résultats des différentes ACV.
L'approche Plan d'expérience/ ACV s'appuie sur une modélisation complète du produit. Plus le nombre de paramètres évalués est grand plus les résultats obtenus sont robustes. L'approche ne peut être rigoureuse que si chaque paramètre possède un nombre de niveaux suffisant pour représenter une grande variété d'alternatives
La résolution par satisfaction de contraintes garantit un ensemble complet de solutions et permet à l'équipe de conception, selon des variables de performances et contraintes spécifiques, de choisir une solution valable du problème de conception.

Interprétation des résultats

Les résultats obtenus par l'approche Pareto /ACV sont difficilement interprétables car l'approche employée ne repose pas sur des modèles approfondis mais sur une simplification du système à quelques processus et composants générant ainsi une diminution de la fiabilité des résultats et donc une interprétation difficile.
Dans le cas d'un modèle complet et d'un nombre d'alternatives suffisant l'approche DoE/ ACV permet d'interpréter les évaluations obtenues mais au détriment d'une mise en œuvre plus longue. Un des avantages d'utiliser les plans d'expériences et de pouvoir quantifier l'effet des variables de conception sur la performance environnementale du système. Les architectures générées par l'approche CSP/ ACV reposent sur une modélisation scientifique du système. Les architectures générées, satisfaisant les contraintes et les objectifs environnementaux, sont fournies avec les évaluations environnementales détaillées par sous-systèmes, séquences du cycle d'utilisation et phase de cycle de vie permettant de focaliser le processus d'optimisation sur les points bloquants de la conception.

Exploration du champ du possible

En se focalisant sur 20% du système, cela limite l'exploration du champ des solutions possibles. Comme nous l'avons souligné, l'intérêt des outils d'écoconception est de pouvoir comparer le plus grand nombres de solutions potentielles, ce qui est contradictoire avec une approche Pareto/ ACV qui permet une simplification en minimisant les pistes d'investigation.
Le principal problème de l'utilisation du plan d'expérience, comme nous l'avons montré sur l'étude de cas, est l'impossibilité de contrôler la faisabilité d'une solution.

L'approche CSP/ ACV permet de simuler toutes les architectures satisfaisant les contraintes du système, donc pas de problèmes de faisabilité. De plus l'utilisation des bibliothèques de composants et des bases de données environnementales permet d'évaluer rapidement les configurations validant la ou les variables de performances recherchées par le concepteur.

Ré exploitation des résultats

Les résultats obtenus par une approche Pareto/ ACV ne sont pas ré-exploitables. La validation de chaque alternative nécessite une nouvelle analyse de cycle de vie. Les résultats obtenus par une approche DoE/ ACV sont difficilement ré-exploitables dans le sens où la modification, l'ajout et la suppression d'une variable nécessitent de recommencer les X expériences. Dans l'approche CSP/ACV tout ou partie d'un modèle peut être ré exploité sur un autre système. Par exemple, il est possible de transposer le modèle de navette maritime sur une gamme de bateaux différente (plus long, plus rapide, un cycle d'exploitation différent, …). Lors de la résolution du modèle, l'architecture satisfaisant les nouvelles contraintes intègrera de nouveaux composants dans les bibliothèques déjà créées.

Conclusions and perspectives

Résumé

Avec l'homogénéisation d'un mode de développement à l'image des pays occidentaux, les ressources terrestres sont de plus en plus mises à mal rendant de plus en plus urgent un développement durable. Pour atteindre un tel développement, il est nécessaire d'intégrer la dimension environnementale dès les premières étapes du processus de conception de produits. De nombreux outils d'écoconception ont été développés pour satisfaire aux conditions du développement durable. Cependant, ces outils sont généralement peu adaptés à la conception de systèmes mécaniques complexes car soit trop spécifiques soit trop généraux ou reposant sur des règles empiriques souvent invérifiables. C'est pourquoi nous proposons dans ce travail de recherche de mettre en place une méthodologie et des outils adaptés à l'écoconception de systèmes complexes.

Nos travaux de recherches nous ont amené à développer 4 approches méthodologiques d'écoconception qui permettent de répondre à un même type de problématique dans des contextes d'application différents.

D'abord, l'approche Pareto/ ACV, introduit dans le chapitre 3, repose sur une simplification du système en considérant que les principales sources d'impact sont générées par une faible partie du système. Cette approche consiste à réaliser une succession d'ACV pour chaque alternative proposée. Cela conduit à un processus d'optimisation fastidieux. Toutefois cette approche fournit des résultats « justes » et est bien adaptée aux raisonnements des concepteurs. En effet par leurs expériences du métier et par leurs connaissances du produit, les concepteurs peuvent facilement identifier les principaux contributeurs d'impacts.

Nous avons, ensuite, développé une approche combinant plans d'expériences et ACV, présentée dans le chapitre 4. Cette approche s'appuie sur une modélisation plus complète du produit. L'approche méthodologique DoE/ ACV permet de générer la « juste » variété d'alternatives représentatives de l'espace des solutions et de hiérarchiser les paramètres du système en fonction de leur influence sur la performance environnementale du système.

Afin de répondre aux limites identifiées lors de l'étude des deux outils précédents nous avons proposé une nouvelle approche basée sur la satisfaction des contraintes (CSP) combinée avec l'ACV et présentée dans le chapitre 5. La phase la plus délicate consiste à modéliser le système (définition des variables de conception, des contraintes du système sous la forme d'équations et des variables de performances que l'on souhaite satisfaire). Il est nécessaire de recueillir des informations sur chaque processus et composants du système, sur la phase d'usage, la maintenance…

L'avantage par rapport aux approches précédentes est la capacité de l'approche CSP/ ACV à garantir un ensemble complet de solutions permettant au concepteur de choisir une solution valable selon des variables de performance (amélioration de la performance environnementale selon des indicateurs environnementaux) et contraintes spécifiées lors de

la définition du cahier des charges.

En complément à l'approche CSP/ ACV, nous avons proposé l'approche EcoCSP, dans le chapitre 6, dans laquelle les spécifications fonctionnelles ne sont plus figées. La méthode ecoCSP permet d'optimiser la configuration de l'architecture produit (par exemple le « downsizing ») correspondant simultanément avec une négociation sur les performances fonctionnelles. L'outil EcoCSP est utilisé pour faire des arbitrages fonctionnels qui modifient l'unité fonctionnelle du système avec les conséquences que cela entraine en termes de réduction d'impact.

Contributions

Nous avons mis en œuvre différentes approches méthodologiques pour l'amélioration environnementale en conception. Ces différentes approches sont adaptées à différents champs d'application :

- L'approche « Pareto »/ ACV semble plus particulièrement utile pour des problèmes d'optimisation locale ; elle permet de répondre rapidement à des problèmes de choix de matériaux ou des choix de configurations simples.
- L'approche Plan d'expériences/ ACV semble elle plus adaptée à des problèmes de configuration de produits (choix d'architectures) lorsque les fonctionnalités des produits sont figées. L'approche est à privilégier pour des produits moyennement complexes disposant d'un nombre d'alternatives restreint.
- L'approche CSP/ ACV (et EcoCSP) semble plus particulièrement destinée à traiter des problèmes d'optimisation globale (choix de technologies) de systèmes complexes incluant l'optimisation fonctionnelle du système. Elle semble peu adaptée à des problèmes d'optimisation locale.

Notre principale contribution touche à la conception de systèmes complexes. La complexité des couplages entre sous-systèmes et la multitude de composants et de solutions technologiques potentielles nécessitent l'utilisation d'outils « intelligents » qui tout en simulant de nombreux scénarios aident le concepteur à effectuer les bons réglages et choix technologiques et ce dès les premières étapes de la conception. Nous sommes convaincus qu'il est nécessaire de procéder à une négociation des performances fonctionnelles afin de parvenir à réduire drastiquement l'empreinte environnementale. (Parvenir à un équilibre des 3 piliers du développement durable : économie, environnement et social.)

Limites

Néanmoins des limites doivent être mentionnées.

L'approche Pareto/ ACV est une approche qui repose sur des règles de conception ou de connaissances empiriques. Pour des systèmes complexes ces règles sont souvent invérifiables et ces sommes d'approximations engendrent de l'incertitude sur la qualité des résultats. Comme l'approche Pareto/ ACV ne repose pas sur des modèles approfondis mais sur une simplification du système à quelques processus et composants elle génère alors une

diminution de la fiabilité des résultats et donc une interprétation difficile.

L'approche Plan d'expériences/ ACV est une approche dont la robustesse des résultats est fortement conditionnée par le nombre de paramètres évalués. De plus l'approche ne peut être rigoureuse que si chaque paramètre possède un nombre de niveaux suffisant pour représenter une « juste » variété d'alternatives. En contrepartie l'exhaustivité du nombre de paramètres et des niveaux associés génère une complication supplémentaire dans la mise en œuvre et le traitement des résultats. Un travail de vérification de la faisabilité de toutes les combinaisons issues de l'expérience doit être fait, sinon l'approche risque de générer des associations technologiques incompatibles. La ré-exploitabilité des résultats n'est pas assurée car la modification, l'ajout et la suppression d'une variable nécessite de reproduire l'ensemble des expériences.

L'approche CSP/ ACV nécessite l'utilisation d'outils numériques qui restent à l'heure actuelle des outils pour informaticiens disponibles en général sous forme de bibliothèques nécessitant la connaissance d'un langage de programmation de type C++ ou Java. Les éléments de langage offerts sont donc très abstraits et souvent mal adaptés au langage d'un concepteur de produit.

L'approche EcoCSP permet de faire des arbitrages fonctionnels afin de réduire les impacts environnementaux des systèmes ; elle n'autorise pas, néanmoins, à se priver d'une réflexion sur les conséquences sociales que ces arbitrages entrainent sur l'usage du système. Le fait de modifier les performances du système en ajoutant, supprimant ou dégradant des fonctions soulève la question des conséquences pour les utilisateurs et, plus largement pour les parties prenantes. En effet dans les simulations le gain environnemental se fait généralement au détriment des considérations sociales et/ ou économiques ; un bouclage est donc nécessaire pour valider la compatibilité avec les enjeux du développement durable.

Perspectives

Ce travail de recherche a permis d'explorer différentes voies pour aider le concepteur à éco-concevoir des systèmes de plus en plus complexes. Ces approches méthodologiques, introduites par 4 articles scientifiques, passent en revue différents niveaux d'amélioration : l'amélioration superficielle (modification des matériaux et des éléments de fixation), la redéfinition de l'architecture du produit à unité fonctionnelle figée, l'amélioration des performances en redéfinissant le nombre et l'amplitude des spécifications fonctionnelles.

Plusieurs gisements d'amélioration de ces approches peuvent être envisagés dans le futur de nos travaux de recherche :

1. Le développement de l'approche CSP/ ACV

L'approche CSP/ ACV a été mise en œuvre pour générer des architectures optimisées en fonction d'objectifs environnementaux dans le cadre de la conception d'une navette maritime à passagers avec un mode de fonctionnement spécifique. En appliquant sur un seul cas d'étude un système complexe dont la modélisation était simplifiée.

Il faudrait expérimenter plus largement cette approche pour mesurer sa sensibilité et sa

robustesse vis-à-vis de navires ayant des modes de navigation et des conceptions totalement différents. De même, l'approche doit être déployée à d'autres systèmes complexes (comme l'automobile) ou moins complexes (comme un aspirateur) pour valider l'intérêt d'une telle approche.

2. L'adoption de l'outil par les entreprises et le concepteur

Une autre piste de travail concerne l'adoption de l'outil en entreprise. Aujourd'hui la modélisation du problème demande l'utilisation d'un langage de programmation de type C++ avec le risque de rebuter le concepteur. D'où la nécessité de développer un langage « concepteur » permettant la description d'un modèle, plus complet (qu'avec les outils actuels) qu'aujourd'hui, sous forme de CSP en manipulant directement les notions de fonctions, fonctions élémentaires, ensembles et entités… classiques dans de nombreux modèles de conception.

3. L'intégration de la négociation de l'unité fonctionnelle dans l'ACV

L'approche EcoCSP permet, outre la génération d'architecture, de spécifier les performances fonctionnelles pour réduire les impacts environnementaux. Dans le cas d'étude proposé, l'évolution des performances fonctionnelles de la navette maritime interférait avec l'usage actuel des utilisateurs (expérience utilisateur) (temps de parcours plus long, fréquence des trajets modifiée, diminution du nombre de places…). Pour limiter la dégradation de la satisfaction des utilisateurs et les impacts économiques induits, des mesures pour inciter les utilisateurs à modifier leurs habitudes sont souvent nécessaires. Une réflexion sur les conséquences d'une négociation fonctionnelle doit être menée pour éviter un déséquilibre entre les 3 piliers du développement durable : économique, environnemental et social. Par exemple, en intégrant une évaluation des conséquences économiques et sociales des mesures…

Publications & communications

- Poster

✓ **CSDM 2012 at Paris**

How to eco-design a complex systems application of CSP/LCA approach to hybrid passenger ferry design

Nicolas Tchertchian, Pierre-Alain Yvars, Dominique Millet

- Conference papers

✓ **42nd CIRP Conference on Manufacturing Systems Sustainable Development of Manufacturing Systems at Grenoble 2009**

An Integrated Strategy of Design for Remanufacturing—application to a B2B product

Haining Liang, **Nicolas Tchertchian**, Dominique Millet, Daniel Brissaud

✓ **ICED'09 at Stanford**

Influence of the Multiples Life Cycles on the Environmental Impact of a Product

Nicolas Tchertchian, Haining Liang, Dominique Millet

(ISBN 978-1-904670-11-7)

✓ **LCE2010 at Hefei**

A method helping to define eco-innovative systems (Product Architecture + Reverse Supply Chain structure + Use Cycles Scenario)

Tchertchian N., Millet D., El Korchi A.

(ISBN 978-7-5650-0186-4)

✓ **LCE2011 at Braunschweig (Best Award PAPER)**

Modular Grouping Exploration to design remanufacturable products.

Tchertchian N., Millet D., Pialot O.

(ISBN 978-3-642-19691-1)

http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-19692-8_71

- Journal papers

✓ IJDE Volume 2 - Issue 3 - 2009

How to identify the most promising areas of environmental improvement at the early stages of the design process?

Dominique Millet, **Nicolas Tchertchian**, Daniel Brissaud

✓ IJETM Volume 15 - Issue 1 – 2012

Design for remanufacturing: What performances can be expected?

Tchertchian N., Millet D., El Korchi A.

- ✓ JCP Volume 22 - Issue 1 – 2012
  How to explore scenario of multiple Upgrade Cycles for sustainable product innovation: the “Upgrade Cycle Explorer” Tool
  Olivier Pialot, Dominique Millet, **Nicolas Tchertchian**

- ✓ JCP Volume 42 – 2013
  Benefits and limits of a Constraint Satisfaction Problem/Life Cycle Assessment approach for the ecodesign of complex systems: a case applied to a hybrid passenger ferry
  Nicolas Tchertchian, Pierre-Alain Yvars, Dominique Millet

- ✓ JED Volume x - Issue x – 2013 *(Mars/ Avril)*
  Modifying module boundaries to design remanufacturable Products: The Modular Grouping Explorer tool
  Nicolas Tchertchian, Dominique Millet, Olivier Pialot
  http://dx.doi.org/10.1080/09544828.2013.776671

Références

Ci-dessous sont listées les références bibliographiques correspondant à l'introduction générale, aux chapitres 1 et 2 ainsi qu'au chapitre conclusion et discussions. Pour les chapitres 3, 4, 5 et 6 les références sont inscrites en fin de chaque chapitre en tant qu'articles scientifiques.

ADEME 2008. L'Efficacité énergétique dans l'Union européenne : panorama des politiques et des bonnes pratiques.

Agarwal, N., Mukkamala, R., 2005. Design of complex systems: issues and challenges. The 24th Digital Avionics Systems Conference (DASC'05).

Andriankaja, H., Bertoluci, G., Millet, D., 2012. Development and integration of a simplified environmental assessment tool based on an environmental categorisation per range of products, Journal of Engineering Design. Available online

Atik A., 2001. Decision supporting methods for the development of environmentally friendly products. Dissertation. Technical University of Darmstadt, Shaker Verlag, Aachen, 2001.

Ayres, R. U. and A. V. Kneese. 1990. Externalities: Economics and thermodynamics. In Economy and ecology: Towards sustainable development, edited by F. Archibugi and P. Nijkamp. Dordrecht: Kluwer

Baumann, H., Boons, F., Bragd, A., 2002. Mapping the green product development field: engineering, policy and business perspectives. Journal of Cleaner Production. 10 (5), 409-425.

Bert B., Mark W. M., 1999. Product, process, and organizational design for remanufacture – an overview of research. Robotics and Computer Integrated Manufacturing,15:167-78, 1999.

Bocquet J. C., Patay E., Schindler A., Dudezert A., 2007. How to build a design product and its end-product system? An original approach called SCOS. Proceedings of the 11th International Conference on Engineering Design (ICED'97), Paris

Brezet H., 1998. Dynamics in ecodesign practice. UNEP Industry and Environment, 20:21 – 4.

Brezet H., van Hemel C., 1997. EcoDesign: A promising approach to sustainable production and consumption, UNEP, France.

Brundtland G et al (1987) Our Common Future: Report of the 1987 World Commission on Environment and Development, Oxford, Oxford University Press.

Cilliers, P., 1998. Complexity and postmodernism: Understanding complex systems, London: Routledge.

Cluzel, F., 2012. Eco-design implementation for complex industrial system - From scenario-based LCA to the definition of an eco-innovative R&D projects portfolio, PhD thesis, ECP.

Daly, H. E. 1973. Towards a steady-state economy. San Francisco: Freeman

Dierneder, S., Schield, R., 1998. Computer aided conceptional design method for mecatronics system in process oriented heavy machinery, in 6th FIC colloque in Skövde.

ECO2-IRN, 1995. Ecologically and Economically Sound Design and Manufacture - Interdisciplinary Research Network. Defining ecodesign, workshop: economically and ecologically sound design and manufacture. Third Forum, Manchester Metropolitan University, UK.

Ernzer, M., Birkhofer, H., 2005. Requirements for environmentally friendly and marketable products. In: Abele, E., Anderl, R., Birkhofer, H. (Eds.), Environmentally-Friendly Product Development. Methods and Tools. Springer-Verlag, London.

FAO, L'état de l'insécurité alimentaire dans le monde. Combattre l'insécurité alimentaire lors des crises prolongées, FAO, Rome, 2010.

Fet, M.A., 1999. Environmental management tols and their application: a review with reference to cases studies, http://www.incose.org.

Freeman, C. 1992. The economics of hope: Essays on technical change, economic growth, and the environment. London: Pinter

Fussler, C., James, P., 1996. Driving Eco Innovation: A Breaktthrough Discipline for Innovation And Sustainability. London: Pitman Publishing.

Gehin A., 2008. Développement d'une Méthodologie de Conception de Produits Durables. PhD Thesis INPG Génie Industriel

Hauschild, M., Jeswiet, J., Alting, L., 2005. From Life Cycle Assessment to Sustainable Production: Status and Perspectives. Manufacturing Engineering 3, 1-21.

Herman, R., S. Ardekani, and J. Ausubel. 1989. In Technology and environment, edited by J. Ausubel and H. Sladovich, pp. 50–69. Washington, DC: National Academy Press.

Horst, T.J.J (van der), Zweers, A., 1993. Environmentally oriented product development; various approaches to success, ICED proceeding 93, p 739 à 746.

International Energy Agency, 2012. "World Energy Outlook 2012".

International Organization for Standardization, 2006a. ISO 14040:2006 – Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (ISO Standard), Environmental management.

International Organization for Standardization, 2006b. ISO 14044:2006 – Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines (ISO Standard), Environmental management.

Janin, M., 2000. Démarche d'éco-conception en entreprise, un enjeu : construire la cohérence entre outils et processus, PhD thesis, ENSAM.

Jolliet O., Saadé M., Grettaz P., Shaked S., 2005. Analyse du cycle de vie (ACV), Comprendre et réaliser un écobilan, Presses polytechniques et universitaires romandes

Karlsson, R., Luttropp, C., 2006. EcoDesign: what's happening? An overview of the subject area of EcoDesign and of the papers in this special issue. Journal of Cleaner Production. 14, 1291-1298.

Krikke H., Bloemhof-Ruwaard J., Van-Wassenhove L. N., 2003. Concurrent product and closed-loop supply chain design with an application to refrigerators. International Journal of Production Research, 41:3 p 689–719.

Kriwet A., 1995. Assessment method for recycling-oriented product design. Hanser Verlag, Munchen. Berlin: Berlin Technique University.

Krob D., 2009. Eléments d'architecture des systèmes complexes, "Gestion de la complexité et de l'information dans les grands systèmes critiques", pp. 179-207, CNRS Editions, 2009.

Lagerstedt J., 2003. Functional And Evironmental Factors In Early Phases Of Product Development-Eco Functional Matrix, PhD Thesis, KTH, Stokholm.

Le Pochat, S., Bertoluci, G., Froelich, D., (2007), 'Integrating ecodesign by conducting changes in SMEs', Journal of Cleaner Production, Volume 15, Issue 7, 2007, Pages 671-680.

Lenox, M., Jordan, B., Ehrenfeld, J., 1996. Diffusion of design for environment: a survey of current practice. Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, pp. 25–30.

Lindahl, M., 2006. Engineering designers' experience of design for environment methods and tools – Requirement definitions from an interview study. Journal of Cleaner Production. 14 (5), 487-496.

Luttropp C., 2005. Strategy and material flow in ecodesign, 12th CIRP international conference on Life Cycle Engineering, Grenoble.

Luttropp C., Lagerstedt J., 2006. EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development, Journal of Cleaner Production, Volume 14, Issues 15-16, Pages 1396-1408.

Meadows D., Randers J., Behrens W., 1972. Limits to Growth, New York: Club of Rome. Potomac Associates.

Millet D., Bistagnino L., Lanzavecchia C., Camous R., 2007. Does the potential of the use of LCA match the design team needs? Suitability of LCA for product design, Journal of Cleaner Production, Vol 15, n°4, p 335-346.

OTA, 1992. Green products by design: choices for a cleaner environment', Congress of the US Office of Technology Assessment, Report of OTA.

Roll, M., Frazier, R., Funk, K., Jordan, B., Lenox, M., 1998. Digital Equipment Corporation - A primer on design for environment.

Simon, M., Evans, S., McAloone, T.C, Sweatman, A., Bhamra, T., Poole, S., 1998. Ecodesign Navigator: A key resource in the drive towards environmentally efficient product design, isbn: 1-871315-74-3, pages: 151, Cranfield.

Simonis, U. E. 1985. Preventive environmental policy. Ekistics 313 (July/August):368–372.

Steinhilper R, Remanufacturing: The Ultimate Form of Recycling. Stuttgart : Fraunhofer IBC Verlag (1998)

Steinhilper R., 1988. Product recycling in engineering, Berlin: IPA-IAO-Forschung und Praxis 115, Spring.

Tonnelier P., Millet D., Richir S., Lecoq M., 2005. Is it possible to evaluate the recovery potential earlier in the design process? Proposal of a qualitative evaluation tool, Journal of Engineering Design, Vol 16 , n°3, p 297-309.

UNICEF, 2012. Progrès en matière d'assainissement et d'alimentation en eau, Rapport 2012.

Weege R. D., 1981. Recycling-oriented Product Development: VDI-Verlag, Dusseldorf.

Williams, R. H., E. D. Larson, and M. H. Ross. 1987. Materials, Affluence, and Industrial Energy Use. Annual Review of Energy 12: 59–86.

Wimmer, W., Züst, R., 2003. ECODESIGN Pilot, Product-Investigation-, Learning- and Optimization-Tool for Sustainable Product Development. Alliance for Global Sustainability Bookseries , Vol. 3, 2003, 112 p., ISBN: 978-1-4020-1090-3.

WWF, 2012. Rapport Planète Vivante 2012. WWF International, Gland, Suisse.

Zhou X., Schoenung J. M., 2007. An integrated impact assessment and weighting methodology: Evaluation of the environmental consequences of computer display technology substitution. Journal of Environmental Management, Vol 83, p 1-24.