



HAL
open science

Vers une meilleure prise en compte des utilisateurs en écoconception : Propositions d'éléments méthodologiques pour l'enrichissement d'une démarche d'optimisation amont

Alexandre Popoff

► To cite this version:

Alexandre Popoff. Vers une meilleure prise en compte des utilisateurs en écoconception : Propositions d'éléments méthodologiques pour l'enrichissement d'une démarche d'optimisation amont. Écoconception. Université de Toulon, 2017. Français. NNT : 2017TOUL0020 . tel-02023924

HAL Id: tel-02023924

<https://theses.hal.science/tel-02023924>

Submitted on 18 Feb 2019

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 DOCTORALE 548

Mer et Sciences

THÈSE

présentée par :

Alexandre POPOFF

Soutenue le : **18 décembre 2017**

pour obtenir le grade de Docteur en Mécanique

Spécialité : Sciences et Technologies Industrielles

Vers une meilleure prise en compte des utilisateurs en écoconception : propositions d'éléments méthodologiques pour l'enrichissement d'une démarche d'optimisation amont

THÈSE dirigée par :
M. MILLET Dominique

Professeur, SeaTech

JURY :

M. BRISSAUD Daniel
M. FROELICH Daniel
Mme VALLET Flore
Mme AZOU-BRIARD Pascale
M. PIALOT Olivier

Professeur, Grenoble INP
Professeur, Arts & Métiers
Docteur, Centrale Supélec
MCF, SeaTech
Ingénieur de recherche, Supméca

Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur

Résumé

L'étendue des impacts environnementaux générés par les activités humaines touche l'ensemble de l'humanité et concerne donc chacun d'entre nous. Depuis la fin du XXème siècle, les voix alertant sur la nécessité d'adapter nos sociétés aux limites planétaires sont de plus en plus nombreuses, fortes et écoutées. Elles promeuvent un équilibre entre activités humaines et écosystème planétaire : ne pas prendre à la Terre plus que ce qu'elle peut produire, ne pas rejeter dans l'environnement plus que ce que celui-ci peut recycler. Les disciplines de l'écoconception intègrent ces aspects environnementaux à la conception de produit. Dans ce cadre, l'objectif de cette thèse est le développement d'une méthodologie d'aide à l'écoconception permettant l'optimisation multi-objectifs du cycle de vie de produits. Cette méthodologie est centrée sur l'utilisateur aussi bien dans la prise en compte de ses contraintes comportementales que dans la mise en avant de ses besoins comme principaux axes directeurs du processus de conception. La méthodologie s'appuie sur des outils d'optimisation pour gérer de manière systémique et systématique la complexité inhérente au cycle de vie du produit. Ils sont utilisés pour trouver des optimums en matière de choix d'alternatives, de configuration du produit et de dimensionnement architectural. La problématique de la modélisation est liée à celle de l'optimisation, cette dernière prenant appui sur cette première. L'optimisation d'un modèle consiste à trouver, pour l'ensemble des variables qui le composent, le paramétrage permettant d'atteindre un objectif donné (par exemple maximiser la valeur d'une expression de performance). Le travail réalisé au cours du doctorat s'articule autour de trois axes de recherche complémentaires. Son objectif global est d'élaborer une méthode d'écoconception de produits basée sur une approche d'optimisation multi-objectifs du cycle de vie. Dans le but d'obtenir des résultats pertinents du point de vue de l'entreprise, cette méthode, à chacune de ses étapes, se caractérise notamment par la prise en compte de l'utilisateur et de ses usages pour l'amélioration de l'attractivité et des performances du produit. Le premier axe de travail est en conséquence focalisé sur la phase d'utilisation. Il s'intéresse à la manière dont différents segments d'utilisateurs vont utiliser un même produit et aux répercussions que vont avoir ces différentes utilisations sur les performances de son cycle de vie. Il propose ensuite des solutions technologiques et conceptuelles afin d'optimiser les performances liées à la diversité des usages. Le deuxième axe de recherche s'appuie sur le précédent afin d'élaborer une méthodologie de modélisation du cycle de vie de produits proche de la réalité. Il est centré sur une problématique cruciale des problèmes d'optimisation : l'élaboration de l'objectif de résolution. Il propose l'utilisation de technique d'identification et de quantification des besoins clients afin de définir un objectif de résolution orientant vers les solutions de conception respectant au mieux les attentes des clients. Le troisième axe de recherche vise à enrichir la méthodologie élaborée dans le deuxième axe. Son but est d'obtenir, par l'optimisation, une sélection d'alternatives de conception permettant de maximiser les performances du système. Une modélisation "gros grain" du produit incluant ses composants et leurs alternatives y est réalisée. Dans la méthode, la possibilité de négociations fonctionnelles est laissée, permettant ainsi une optimisation plus libre que pour un produit dont le mix fonctionnel serait figé.

Mots-clés : Écoconception, Conception centrée utilisateur, Satisfaction de Contrainte, Optimisation Multi-Objectifs, Analyse du cycle de vie (ACV), Fonctionnalité.

Remerciements

Je remercie en premier lieu Dominique Millet, mon directeur de thèse, pour son encadrement tout au long des années passées à travailler conjointement. Son écoute, ses conseils, ses interventions et sa confiance générale ont été les mots clés d'un encadrement à la fois libre et assidu, laissant la place à l'expression de ma recherche tout en la guidant dans l'océan de la littérature scientifique où elle aurait pu se perdre de nombreuses fois.

Merci également à tous les membres de mon jury de thèse qui ont pris de leur temps pour participer à la finalisation de mes travaux en examinant le document de thèse. Daniel Brissaud, Daniel Froelich, Pascale Azou-Briard, Flore Vallet et Olivier Pialot, c'est une chance et un honneur de pouvoir profiter de vos connaissances pour évaluer mes travaux.

Je remercie aussi, au travers de leurs directeurs respectifs Jean-Pierre Barbot et Vincent Hugel, les laboratoires Quartz et Cosmer qui m'ont accueilli en leur sein et m'ont permis de mener mes travaux pleinement en profitant de l'appui d'équipes et de structures bienveillantes.

Merci à Nicolas Tchertchian qui, malgré son assiduité au travail, a toujours trouver le temps de me conseiller et de m'aider chaque fois que le besoin était présent. Je te souhaite de trouver la route qui t'amènera aux plus beaux sommets (et pas seulement au Mont Ventoux) !

Merci à Olivier Pialot dont le sérieux n'a d'égal que la bonne humeur et qui a lui aussi toujours été de bon conseil et pertinent dans l'orientation de mes travaux. Je te souhaite un bonheur sincère dans ta nouvelle vie familiale !

Contenu

Contenu.....	6
Liste des figures.....	11
Liste des tableaux.....	13
Liste des équations.....	14
Chapitre 1. Résumé étendu.....	15
Positionnement.....	16
Axes de recherche.....	17
Applications.....	21
Apports et perspectives.....	22
Références.....	22
Chapitre 2. Contexte et problématique de recherche.....	24
Introduction générale : enjeux et défis de l'écoconception et des comportements écoresponsables.....	24
Contexte de recherche.....	36
L'écoconception : un nouveau pilier de la recherche académique et des activités industrielles et commerciales.....	36
Principes clés de l'écoconception de produits et de services.....	38
Panorama des outils de l'écoconception.....	42
Problématique et méthodologie de recherche.....	48
Comment obtenir une modélisation réaliste des usages d'un produit et comment contrer les usages ayant des conséquences négatives ?.....	48
Comment optimiser la conception du cycle de vie et l'attractivité d'un produit avec une approche multicritère ?.....	49
Comment obtenir une sélection d'alternatives de conception pertinente au cours d'une démarche d'optimisation où les variables de conception ne sont pas figées ?.....	49
Synthèse.....	50
Références.....	50
Chapitre 3. Proposition d'une méthodologie générale.....	53
Panorama de la littérature scientifique explorée.....	53

Optimisation en écoconception.....	53
Attractivité des produits.....	54
Comportements et fin de vie soutenables	56
Modélisation.....	61
Perspectives.....	62
Méthodologie générale.....	62
Axe 1: Identification, quantification et modélisation des usages réels d'un produit et de leurs conséquences environnementales, étude de la pertinence environnementale des solutions visant à influencer les comportements des utilisateurs.....	63
Axe 2: Une méthode pour l'optimisation multi-critère du cycle de vie de produits prenant en compte l'attractivité produit-client.....	64
Axe 3: Détermination du panel d'alternatives de conception pertinent à intégrer à la démarche d'éco-optimisation	66
Articulation et complémentarité des axes de travail.....	66
Validation et application	68
Références.....	69
Chapitre 4. Proposition d'une méthode pour l'identification et la quantification des dérives d'usage environnementales.....	74
Introduction.....	74
The behaviour-centered design challenge.....	76
The UED concept.....	77
Considering users and usages.....	77
User awareness and design solutions	78
The UED methodology	79
Step 1: Definition of the UoR.....	79
Step 2: User segments.....	79
Step 3: UEDs identification and experimentation.....	79
Steps 4: Usage models	80
Step 5: environmental evaluation.....	80
Results.....	80
Case study.....	80

Usage of Reference	81
User segments	81
UED identification and experimentation.....	82
UED models and environmental evaluations	84
Design solutions	90
Discussion.....	90
Conclusion	91
Acknowledgements.....	92
References.....	93
Chapitre 5. Proposition d'un modèle simplifié pour une prise en compte dynamique des reallions produit-usages au cours du processus d'écoconception	97
Introduction: on product use and life-cycle assessment	97
User-centred eco-design strategies, from technological to behavioural approaches.....	99
From user free-will to product cohersion	99
A model to explore different eco-design strategies integrating Life Cycle Analysis.....	101
Building DEEM.....	102
The integration into the general design process	104
The paper towel dispenser	106
CHOOSE-UNDERSTAND. The existing paper towel	107
EXPLORE. Generalities.....	107
EXPLORE. Strategy 1: eco-feedback via an informative sticker	108
EXPLORE. Strategy 2: eco-feedback via a popping flag.....	109
EXPLORE. Strategy 3: eco-feedback via an LCD screen	110
DECIDE. Discussions on exploration.....	111
Sensitivity Analysis.....	114
Discussion and perspectives.....	116
References.....	117
Chapitre 6. Proposition d'une démarche pour l'écoconception du cycle de vie centrée utilisateur : prise en compte de l'attractivité produit-client dans le processus d'optimisation.....	121
Introduction.....	121
Ecodesign complexity and optimization.....	122

Existing optimization methods for ecodesign	124
The EcoCSP-QFD method	125
Introduction: description and context	125
Using QFDE to describe the problem	125
The CSP model	126
Impact Functions.....	127
Solving objective	127
Solving the CSP.....	128
Results	128
Case study.....	128
Application of the EcoCSP-QFD method.....	129
Discussion.....	139
Conclusions and perspectives.....	140
References.....	141
Chapitre 7. Intégration des dérives d'usages au sein de la méthode EcoCSP-QFD	144
Première intégration : utiliser les différents segments d'utilisateurs dans la matrice planning de la maison de la qualité.....	144
Retour sur la maison de la qualité	144
Intégration des dérives d'usage.....	149
Deuxième intégration : utiliser les caractéristiques techniques pour corriger les comportements qui créent le plus d'impacts	149
Troisième intégration : stratégies de modélisation des dérives d'usage en CSP	152
Références.....	153
Chapitre 8. Elargissement de la démarche en phase amont de conception : application à la sélection d'alternatives 155	
Introduction.....	155
Les choix en phase de conception	158
Un ensemble de critères de choix particulier : les impacts environnementaux	159
Méthodes pour la sélection d'alternatives de conception.....	161
Protocole expérimental.....	166
Expérimentation	167

Présentation du cas.....	167
Méthode de sélection par somme pondérée	172
Méthode par optimisation	181
Résultats	184
Méthode « somme pondérée »	184
Méthode optimisation	184
Discussion	187
Conclusion	188
<i>Références</i>	189
Chapitre 9. Discussion générale	191
Chapitre 10. Conclusions et perspectives	193
Contributions et limites.....	194
Perspectives.....	195
Publications personnelles	197

Liste des figures

Fig. 1 : positionnement des trois axes de recherche au sein du processus de conception	21
Fig. 2. Ressources renouvelables et non renouvelables selon une échelle de temps humain (Bihoux et De Guillebon, 2013).	25
Fig. 3. Taux de recyclage des métaux (Reuter et al., 2013).....	26
Fig. 4. Diagramme du développement durable.....	27
Fig. 5. Consommation d'énergie par personne en kWh par an, moyenne mondiale (IEA, 2016).	29
Fig. 6. Répartition de la consommation d'énergie finale en France en 2012 (Jancovici, 2015).	30
Fig. 7. Part de l'utilisation des technologies de l'information dans la consommation globale d'électricité à l'horizon 2030 (Andrae et Edler, 2015).	31
Fig. 8. Limite planétaire et état actuel pour plusieurs indicateurs environnementaux cruciaux (Steffen et al., 2015).....	32
Fig. 9. L'Europe au dernier maximum glaciaire, il y a 20 000 ans (Ehlers et al., 2011).....	33
Fig. 10. Principales normes internationales autour du développement durable.....	36
Fig. 11. Le modèle des quatre étapes de l'écoconception (Charter et Chick, 1997)	37
Fig. 12. Les étapes du cycle de vie d'un produit	38
Fig. 13. Positionnement des méthodes du Df3R	39
Fig. 14. Les cinq leviers du changement vers un comportement soutenable (Unilever, 2011)	40
Fig. 15. Modèle du système <i>Lean Production</i>	41
Fig. 16. Classification des outils d'écoconception, d'après Bovea et Pérez-Belis (2012).....	43
Fig. 17. Les 4 étapes de l'ACV	44
Fig. 18. Les différents niveaux d'aggrégation de la méthode ReCiPe	45
Fig. 19 : La Maison de la Qualité du QFD	46
Fig. 20. Les trois questions de recherche du travail de thèse	50
Fig. 21. Les 4 champs de la littérature scientifique explorée	53
Fig. 22. Les principes du <i>Kansei Engineering</i> illustrent parfaitement l'intérêt du concept de <i>Design for Desirability</i> (Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan, 2010).....	55
Fig. 23. Approche classique VS approche centrée utilisateur (extrait d'une présentation de Popoff 2016 à la conférence Life Cycle Management 2015 à Bordeaux).....	63
Fig. 24. Illustration de la complémentarité des trois axes de travail.....	67
Fig. 25. Overall scheme of the IMPACT 2002+ framework, based on Jolliet et al. (2003)	86
Fig. 26. Bill of materials of the vacuum cleaner	87
Fig. 27. Environmental impacts caused by electrical overconsumption of UEDs.....	88
Fig. 28. Environmental impacts caused by UED overconsumption and early replacement of the product	88
Fig. 29. Environmental impact of the usage practices of each user segment.....	89
Fig. 30. Strategies from designing sustainable behaviour. (Lilley (2009), Fogg (1999), Wever et al. (2008)).....	101

Fig. 31. Mitigation rate for a year period	105
Fig. 32. Exploring different eco-strategy behaviours	105
Fig. 33. Redesign process and DEEM	106
Fig. 34. LCA decomposition for existing paper towel dispenser.....	106
Fig. 35. GLCA 1 year vs 5 year for eco strategy exploration	109
Fig. 36. LCA decomposition for paper towel dispenser with a sticker	109
Fig. 37. LCA decomposition for paper towel dispenser with a flag	110
Fig. 38. LCA decomposition for paper towel dispenser with a LCD screen	112
Fig. 39. Exploration space for eco-strategy alternatives.....	113
Fig. 40. Variations for sensitivity analysis.....	114
Fig. 41. Sensitivity analysis – Lifespan 2 years.....	115
Fig. 42. Sensitivity analysis – Lifespan 5 years.....	116
Fig. 43. Sensitivity analysis – Lifespan 7 years.....	116
Fig. 44. The EcoCSP-QFD method	125
Fig. 45. Phases 1 & 2 matrix from the QFD technic and their use for the CSP model	126
Fig. 46. Picture of the dinghy.....	129
Fig. 47. Architectural variables	129
Fig. 48. Parts included in the otpimization.....	129
Fig. 49. Matrix phase 1 of the QFDE technique for the case of the inflatable dinghy	131
Fig. 50. How the glued parts are assembled	134
Fig. 51. Représentation graphique des 5 types de qualité du modèle de Kano	147
Fig. 52. Hiérarchisation des exigences client par la méthode AHP reprenant les mêmes pondérations Client-Concurrence-Stratégie que la méthode traditionnelle.....	148
Fig. 53. Matrice QFD phase 1 du cas d'étude de l'aspirateur balai	151
Fig. 54. Matrice QFD phase 2 du cas d'étude de l'aspirateur balai	152
Fig. 55. Comparaison des méthodes somme pondérée et optimisation	166
Fig. 56. From left to right: picture of the dinghy, architectural variables and parts included in the optimization	168
Fig. 57. Représentation des modules de modélisation.....	182
Fig. 58. Evolution des impacts environnementaux et de la sélection d'alternatives en fonction de la valeur du coefficient de pondération de l'expression de compatibilité	186

Liste des tableaux

Table 1 Characteristics of the participants with averages and, in parentheses, standard deviations ..82	82
Table 2 UEDs distribution depending on user segment expressed in percentages of persons doing to the UED	83
Table 3 User performance after feedback taking account of segments.....	83
Table 4 UED consequences in terms of electricity overconsumption and LT decrease of product parts	85
Table 5 Mathematical expressions of UEDs environmental impacts	87
Table 6 Sum of the environmental impacts caused by UEDs for each user segment	89
Table 7 Exploration intervals for eco-strategy alternatives	108
Table 8 Exploration for paper towel eco-strategies	111
Table 9 Six best options in eco-strategy alternatives	114
Table 10 List of constraints included in the model of the dinghy	132
Table 11 Several feasible geometrics for the float.	133
Table 12 Expressions of masses and volumes of the accessories	133
Table 13 Expressions of the glued surfaces.....	134
Table 14 Impact coefficients per mass/volume related to the manufacturing phase.....	135
Table 15 Impact coefficients and expressions for the calculation of the impact scores of the life cycle of the dinghy (manufacturing of materials excluded)	135
Table 16 Results of the optimizations with three different objectives.....	137
Table 17 Sensitivity analysis on the solving objective	138
Table 18 Consequences of the sensitivity analysis of the solving objective on the results	138
Tableau 19 Matrice de planning du cas d'étude de l'aspirateur balai.....	145
Tableau 20 Les 5 types de qualité du modèle de Kano.....	146
Tableau 21 Traduction des dérives d'usage en exigences client pour le cas de l'aspirateur balai.....	149
Tableau 22 Evolution du nombre d'alternatives et des besoins en données associées selon les phases du processus de conception.....	158
Tableau 23 Propriétés des méthodes de conception	164
Tableau 24 Description des alternatives de conception	168
Tableau 25 Indicateurs de performance des alternatives par phase du cycle de vie.....	169
Tableau 26 Matrice de compatibilité des alternatives iner-modules.....	171
Tableau 27 Avis émis pour chaque indicateur et chaque phase du cycle de vie.....	172
Tableau 28 Conversion des avis en scores	177
Tableau 29 Détermination des pondérations relatives à chaque phase du cycle de vie par la méthode AHP	178
Tableau 30 Calcul des scores de performances finaux	179
Tableau 31 Liste des variables, domaines, contraintes et objectifs qui composent la modélisation du système	181

Tableau 32 Résultats obtenus par la méthode par optimisation	185
--	-----

Liste des équations

Eq. 1. Expression of the global LCA for the product	102
Eq. 2. Expression of the mitigation rate	103
Eq. 3. Representation of a CSP model.....	127
Eq. 4 Combination of multiple sub-objectives to shape a global objective	128
Eq. 5 Expression of the SL function of the fabric thickness.....	135
Eq. 6 Expression of the global QFDE objective	136
Eq. 7. Le facteur d'amélioration de Tan et al. (2010)*	148
Eq. 8. Le facteur d'amélioration de Chaudha et al. (2011)*	148

Chapitre 1. Résumé étendu

Les activités humaines, par définition, modifient l'état du monde, notamment en prélevant des ressources naturelles et en les transformant en matériaux et en énergies. Ce faisant, les stocks des ressources fossiles diminuent, des changements climatiques s'amorcent, l'équilibre des écosystèmes est modifié, la santé humaine est mise en danger. L'étendue des impacts environnementaux générés par les activités humaines est globale ; elle touche l'ensemble de l'humanité et concerne donc chacun d'entre nous. Depuis la fin du XX^{ème} siècle, les voix alertant sur la nécessité d'adapter nos sociétés aux limites planétaires sont de plus en plus nombreuses, fortes et écoutées. Elles promeuvent un équilibre entre activités humaines et écosystème planétaire : ne pas prendre à la Terre plus que ce qu'elle peut produire, ne pas rejeter dans l'environnement plus que ce que celui-ci peut recycler.

Les quantités de matériaux et d'énergies extraites de l'environnement doivent donc être minimisées et l'utilisation qui en est faite doit être optimisée. L'amélioration des rendements énergétique et matériaux doit donc être au coeur de tout projet d'activité. Elle consiste à réduire au maximum les pertes de matières et d'énergies au cours d'un processus, c'est-à-dire à se rapprocher d'un optimum théorique. Les enjeux dans le domaine de la conception de produit sont énormes. Il est impossible de quantifier les réductions d'impacts environnementaux qu'entraînerait une optimisation de la production mondiale mais il est évident qu'elle est une étape clé de la transition vers un développement durable de nos sociétés. Les défis à relever sont grands. Dans un premier temps, la définition même de l'optimum en matière des besoins énergétiques et matériels n'est pas aisée. Les produits doivent être conçus pour répondre à un cahier des charges précis qui devrait permettre une grande précision de calcul des besoins. Cependant, de nombreuses contraintes viennent complexifier la démarche : des facteurs de sécurité doivent être appliqués en fonction des incertitudes liées à l'utilisation du produit, des contraintes venant des fournisseurs ou issues de l'utilisation de pièces standard peuvent forcer à des compromis dégradant les performances environnementales, la pression de la concurrence subie par les entreprises et les forçant à accélérer la mise sur le marché de leurs nouveaux produits peut dégrader la qualité du processus de conception, etc. De plus, la prise en compte du cycle de vie complet du produit (extraction des matières premières, fabrication, utilisation, maintenance et fin de vie, en tenant aussi compte de toutes les étapes de transport intermédiaires) ajoute des variables supplémentaires et rend plus difficile la recherche d'un paramétrage de conception optimum. Il apparaît donc que, dans le domaine de l'écoconception, des outils puissants doivent être mis au service des concepteurs dans le cadre de cette recherche d'optimum, afin de concevoir les produits les plus respectueux des contraintes environnementales.

Un second aspect, très lié à la conception des produits, est l'utilisation qui est faite de ces derniers une fois entre les mains des consommateurs. Des efforts énormes ont pu être fournis par les concepteurs afin d'optimiser au maximum les impacts liés à l'utilisation du produit. Ils ont défini des séquences d'utilisation permettant d'exécuter toutes les fonctionnalités avec un minimum de consommations. Pourtant, si les utilisateurs ne respectent pas les préconisations d'emploi, tous les efforts de

conception risque d'avoir été vains. Une mauvaise utilisation d'un produit est en effet susceptible de causer des impacts environnementaux additionnels et imprévus. Ainsi, en plus de définir une utilisation optimale du produit, les concepteurs doivent s'attacher à identifier les dérives possibles et à trouver les moyens de les contrer ou de les corriger.

Positionnement

L'objectif de cette thèse est le développement d'une méthodologie d'aide à la conception permettant l'optimisation multi-objectifs du cycle de vie de produits. Cette méthodologie est centrée sur l'utilisateur aussi bien dans la prise en compte de ses contraintes comportementales à l'utilisation que dans la mise en avant de ses besoins comme principaux axes directeurs du processus de conception. La méthodologie s'appuie sur des outils d'optimisation pour gérer de manière systémique et systématique la complexité inhérente au cycle de vie du produit. Ils sont utilisés pour trouver des optimums en matière de choix d'alternatives, de configuration du produit et de dimensionnement architectural.

Cette thèse se positionne au sein d'une littérature scientifique riche. Dans le domaine de la modélisation, de nombreux travaux portent sur la recherche des meilleures manières de modéliser les différents aspects liés au cycle de vie du produit. Il peut s'agir de modélisations architecturale du produit et des phénomènes physiques liés à son fonctionnement, de modélisations des phases du cycle de vie et notamment des bouclages liés à la fin de vie, de modélisations des usages, etc. Parmi les objectifs récurrents de ces recherches, on trouve souvent des aspects tels que la rapidité de modélisation, la collecte de données fiables et la traduction de phénomènes réels en langage concepteur.

La problématique de la modélisation est liée à celle de l'optimisation, cette dernière prenant appui sur cette première. L'optimisation d'un modèle consiste à trouver, pour l'ensemble des variables qui le composent, le paramétrage permettant d'atteindre un objectif donné (par exemple maximiser la valeur d'une expression de performance). Les recherches dans ce domaine viennent principalement des sciences de l'informatique où sont élaborés les algorithmes et logiciels utilisés pour coder et résoudre les problèmes d'optimisation. Cependant, des recherches ont aussi lieu dans les domaines de la conception pour adapter la programmation au langage de la conception et pour créer des outils adaptés aux spécificités des problèmes de conception.

Deux aspects importants du travail de thèse sont la prise en compte, d'une part, des comportements des utilisateurs et, d'autre part, de la fin de vie soutenable des produits. Au sein du cycle de vie du produit, ces deux phases amènent des complexités particulières. La phase d'utilisation peut présenter des incertitudes fortes liées au fait que les utilisateurs ne soient pas sous contrôle ; leurs actions, si elles dévient d'un schéma prescrit, peuvent engendrer des impacts environnementaux supplémentaires. De nombreuses études montrent les liens entre comportement des utilisateurs et conception de produit et s'attachent à trouver les mécanismes permettant d'influencer positivement

les utilisateurs. La fin de vie, quant à elle, doit être vue comme un nouveau point de départ pour le produit et ses composants. L'ensemble peut être recyclé, certaines parties peuvent être réutilisées, d'autres remanufacturées... Ces différents scénarios engendrent autant de possibilités de modélisations et éventuellement des incertitudes quant aux performances globales du cycle de vie.

Le dernier aspect par rapport auquel se positionne le travail est l'attractivité des produits. Il semble en effet primordial, lors de la conception d'un produit, de penser au plus tôt aux points clés qui vont influencer son attractivité envers les clients. Dans ce domaine, de nombreux chercheurs ont proposé méthodes et outil afin d'identifier et valoriser les aspects du produits jouant un rôle pour sa désirabilité.

L'exploration de la littérature scientifique et l'identification de lacunes sur les aspects cités précédemment ont permis de définir les trois questions de recherche suivantes :

Première question de recherche : Comment élaborer une modélisation réaliste des usages d'un produit, mettant en avant le caractère plus ou moins soutenable des différents segments d'utilisateurs ; quelles solutions pour orienter l'utilisateur vers un usage optimal ?

Deuxième question de recherche : Comment, et avec quels outils, élaborer une méthodologie transversale pour l'optimisation environnementale et multicritère du cycle de vie des produits prenant en compte les aspects d'attractivité envers les utilisateurs ?

Troisième question de recherche : Comment déterminer le panel d'alternatives de conception pertinent à intégrer à la démarche d'éco-optimisation ?

Axes de recherche

Le travail réalisé au cours du doctorat s'articule autour de trois axes de recherche complémentaires. Notre objectif global est d'élaborer une méthode d'écoconception de produits basée sur une approche d'optimisation multi-objectifs du cycle de vie. Dans le but d'obtenir des résultats pertinents du point de vue de l'entreprise, cette méthode, à chacune de ses étapes, se caractérise notamment par la prise en compte de l'utilisateur et de ses usages pour l'amélioration de l'attractivité et des performances du produit. Le premier axe de travail est en conséquence focalisé sur la phase d'utilisation. Il s'intéresse à la manière dont différents segments d'utilisateurs vont utiliser un même produit et aux répercussions que vont avoir ces différentes utilisations sur les performances du produit. Il propose ensuite des solutions technologiques et conceptuelles afin d'optimiser les performances liées à la phase d'utilisation. Le deuxième axe de recherche s'appuie sur le précédent afin d'élaborer une méthodologie de modélisation du cycle de vie de produits proche de la réalité. Il est centré sur une problématique cruciale des problèmes d'optimisation : l'élaboration de l'objectif de résolution. Il propose l'utilisation de technique d'identification et de quantification des besoins clients afin de définir un objectif de résolution orientant vers les solutions de conception respectant au mieux les attentes

des clients. Le troisième axe de recherche vise à enrichir la méthodologie élaborée dans le deuxième axe. Son but est d'obtenir, par l'optimisation, une sélection d'alternatives de conception permettant de maximiser les performances du système. Une modélisation "gros grain" du produit incluant ses composants et leurs alternatives est donc réalisé. Dans la méthode, la possibilité de négociations fonctionnelles est laissée, permettant ainsi une optimisation plus libre que pour un produit dont le mix fonctionnel serait figé.

Premier axe : exploration des conséquences réelles de la phase d'utilisation et prise en compte des usages pour optimiser la performance environnementale de produits manufacturés.

Afin de préparer notre démarche d'optimisation des performances du cycle de vie de produits, il nous est apparu nécessaire de faire une mise au point liminaire sur la phase d'utilisation des produits du quotidien. Comme pour les autres phases de son cycle de vie, il est possible d'optimiser un système afin de garantir ses performances au cours de sa phase d'utilisation. Cette garantie, en revanche, ne sera probablement valable que dans le cas d'une utilisation optimale du produit : celle prévue par les concepteurs. Cependant, Bhamra et al. (2008) nous montrent que les impacts liés à l'utilisation des produits sont souvent causés par la multitude des comportements des utilisateurs et donc des différentes utilisations possibles. Cela fait référence aux sur-impacts liés à des dérives d'usages des utilisateurs (Serna-Mansoux et al., 2014), venant s'ajouter aux impacts liés à l'utilisation normale du produit. La compréhension des mécanismes déterminant les usages devient nécessaire au concepteur qui cherche à éviter ces sur-impacts (Wever et al., 2008) et à améliorer les performances, non seulement fonctionnelles mais aussi environnementales, voire économiques et sociales (Lilley, 2009), du produit qu'il conçoit. La compréhension des usages, leur prise en compte puis l'élaboration de solutions technologiques visant à guider l'utilisateur vers un usage optimal sont donc les clés pour optimiser les performances de la phase d'utilisation (Elias et al., 2008 ; Lockton et al., 2008).

Notre travail sur cet axe de recherche a été d'élaborer une méthodologie permettant de répondre aux problématiques citées ci-dessus. Notre méthodologie consiste, dans un premier temps, en l'exploration de la diversité des utilisateurs et des usages sur le terrain ; cela permet, dans un deuxième temps, d'identifier les dérives d'usages et les sur-impacts associés ; puis, dans un dernier temps, de formaliser les solutions technologiques permettant d'éviter ces sur-impacts en guidant les utilisateurs vers une utilisation optimale.

Cette méthodologie a fait l'objet d'une publication dans la revue *Journal of Cleaner Production*, reproduite dans le chapitre 3.

Deuxième axe : développement d'une méthode EcoCSP-QFD pour une optimisation multi-objectif du cycle de vie de produits centrée sur l'attractivité produit-client.

La conception d'un produit ne consiste plus simplement en l'élaboration de solutions technologiques permettant d'accomplir un ensemble de fonctions donné (Pugh, 1991). Le contexte actuel impose des objectifs de plus en plus contraignant aux concepteurs qui doivent désormais réfléchir à des produits plus respectueux de l'environnement, plus économes, plus « propres », plus équitables, plus recyclables, etc. En d'autres termes : plus performants sur l'ensemble de leur cycle de vie (Conseil Européen, 2000). Pour ce faire, des méthodes et outils d'évaluation environnementale et d'optimisation ont été développés au fil du temps et se sont prouvés efficaces en pratique (Azapagic and Clift, 1999, 1999a, 1999b). Pourtant, en étudiant la littérature scientifique sur le sujet, Pieragostini et al. (2012), malgré quinze méthodologies couplant ACV et méthode d'optimisation recensées, montrent l'absence de méthodologies généralistes appliquées à la conception de produits.

Le travail sur ce deuxième axe de recherche a été d'élaborer une méthodologie de conception détaillée permettant d'optimiser les performances d'un produit en accord avec les attentes des clients. La méthode permet d'explorer les domaines de valeurs possibles des variables de conception du produit afin d'y trouver les meilleures solutions au regard d'un objectif donné. L'objectif de résolution est primordial : il dirige le processus de recherche d'optimum. Ici, il est élaboré à l'aide de la technique du QFD qui permet d'identifier et de quantifier les besoins des clients et de les traduire en caractéristiques techniques. Ce sont ces caractéristiques, modélisées dans le modèle global du système, qui composent l'expression de l'objectif de résolution. Pour appliquer la méthode, une approche de modélisation par contraintes est utilisée. Les données environnementales présentes dans la modélisation sont issues de calculs faits à l'aide de logiciels d'ACV. Les coûts sont calculés pour être également intégrés à l'optimisation. La combinaison CSP-QFD s'avère être un outil performant pour explorer efficacement l'espace de conception du produit avec en ligne de mire la satisfaction des besoins clients.

Cette méthodologie fait l'objet d'un projet de publication dans la revue *Journal of Industrial Ecology*.

Troisième axe : outil d'optimisation pour la sélection d'alternatives de conception simultanée à l'optimisation architecturale d'un produit et la maximisation des performances environnementales.

Une étape clé des démarches d'optimisation pour la conception de produits est la modélisation du système sous forme d'équations. Lorsque le produit est encore en phase de conception et que de nombreuses alternatives de conception existent, ce travail peut devenir rédhibitoirement chronophage si le but est de modéliser finement la totalité du système et de ses alternatives. Il est alors nécessaire de réaliser une modélisation "gros grain" du système permettant d'obtenir des résultats pertinents par rapport aux critères de décision utilisés dans le cadre de la sélection d'alternatives.

Dans ce troisième axe de travail, une méthode de sélection d'alternatives de conception est développée. Elle permet d'effectuer la recherche de la meilleure combinaison d'alternatives alors que l'ensemble des variables du système (architecturales et autres) varient pour trouver le meilleur paramétrage possible. Il y a donc sélection d'alternatives et optimisation simultanées. Les alternatives

retenues correspondent donc au paramétrage du système. Elles sont aussi choisies en fonction de leur compatibilité les unes avec les autres. La méthode met en avant les aspects de soutenabilité et de cycle de vie afin d'obtenir une sélection pertinente et offrant une compatibilité maximale dans le cadre d'une démarche globale d'écoconception.

Cette méthodologie fait l'objet d'un projet de publication dans la revue *Journal of Mechanical Design*.

Les trois axes de travail se veulent aussi complémentaires de par leurs différents types de conception auxquels ils sont associés (figure 1). Le travail réalisé sur les éco-feedbacks est fait *a posteriori*. Le produit existe déjà et l'on vient y greffer un module permettant de transmettre des informations à l'utilisateur quant aux meilleurs comportements à adopter. Ces solutions sont donc peu intégrées au produit et ne font pas l'objet d'une réflexion d'ensemble au moment de sa conception. L'espace de conception n'est pas exploré et coïncide avec une solution déjà pressentie ; on est dans le cas d'un processus de conception que l'on peut qualifier de routinier. Le travail associant CSP et QFD se déroule, lui, au cours des phases de conception architecturale et de conception détaillée. Il apporte des réponses en matière de choix d'architecture et de dimensionnement du produit. Il permet une exploration restreinte de l'espace de conception autour de la solution spécifique qui a été modélisée. Il permet aux concepteurs et ingénieurs de déterminer les paramètres optimaux des variables de conception pour maximiser les performances du cycle de vie du produit. Cette exploration vertueuse peut être qualifiée de processus de "conception améliorante". Enfin, le travail réalisé sur la problématique de la sélection d'alternatives se positionne un cran en amont, au niveau des phases de définition fonctionnelle et de conception globale. Il propose une modélisation "gros grain" du système et de ses alternatives. L'espace de conception exploré est beaucoup plus grand qu'avec l'axe de travail précédent et le détail des résultats obtenus est moindre. Cette méthode permet de comparer une grande diversité d'alternatives de conception en obtenant des résultats pertinents quant à leurs conséquences sur les performances du cycle de vie du produit. Cet axe se positionne dans une démarche qui est davantage tournée vers l'innovation

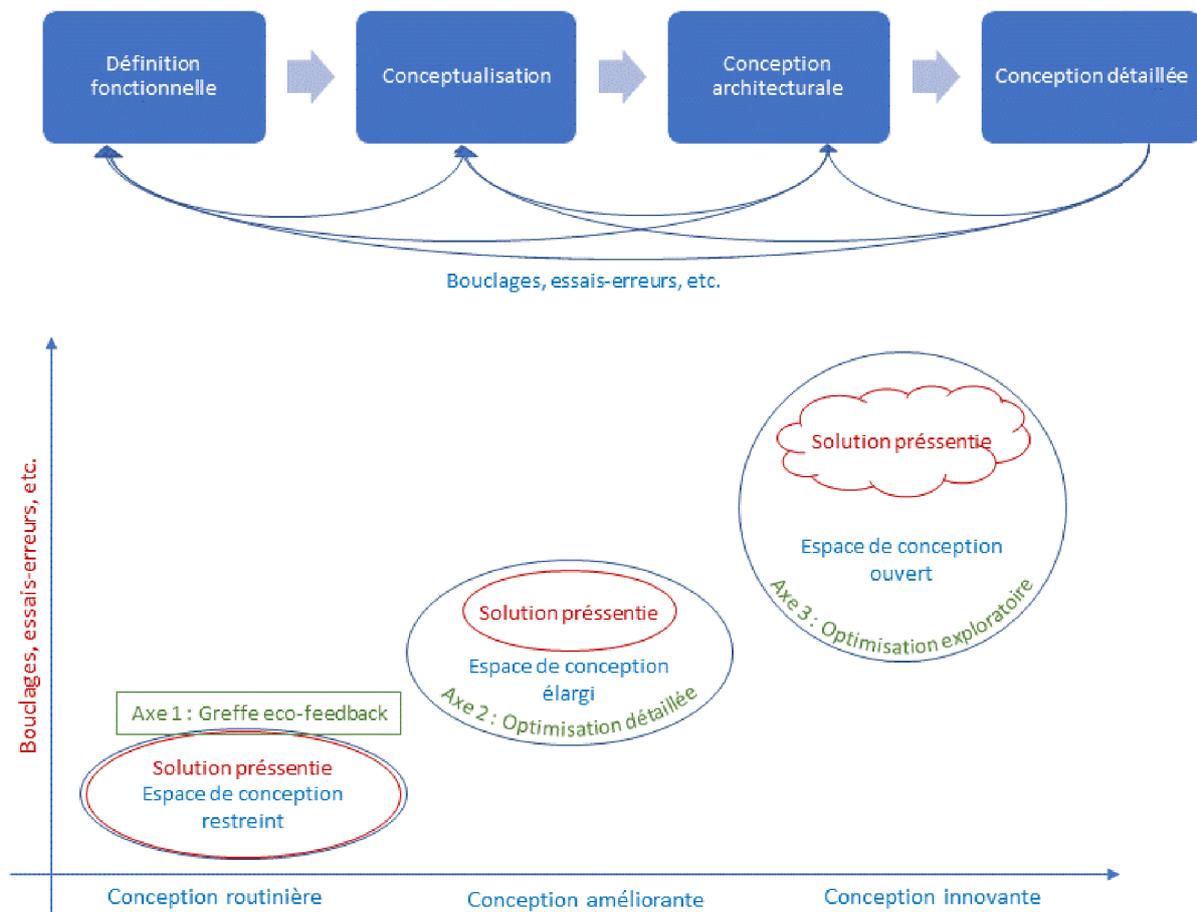


Fig. 1 : positionnement des trois axes de recherche au sein du processus de conception

Applications

Les travaux menés dans le cadre de la thèse ont été appliqués principalement au sein du projet FUI 17 "INOVANEX" par lequel ils ont été financés. Le projet Inovanex est porté par l'entreprise Orange Marine, basée à La Clotat (13) et consiste à reconcevoir une gamme d'annexes gonflables dans le but de réduire drastiquement le poids et l'encombrement des produit et à réduire leurs impacts environnementaux tout en conservant un prix concurrentiel. Pour ce faire, un tissu innovant doit être développé (lot géré par d'autres partenaires du projet : l'Ecole des Mines d'Alès et l'entreprise Chomarat) et la conception de l'annexe et de son cycle de vie doit être revue. C'est sur ce dernier point qu'interviennent les méthodes d'optimisation appliquées à l'architecture, au dimensionnement et à la configuration (choix des meilleurs modules et composants) du produit.

Les travaux focalisés sur la phase d'utilisation des produits ont dû, par nécessité, adopter des cas d'expérimentation différents : des produits présentant des problématiques d'utilisations complexes. Deux produit ont été sujets d'expérimentations : l'aspirateur balai sans fil et le distributeur de serviettes en papier.

Apports et perspectives

A l'issue des travaux conduits au cours des trois années de thèse, les principales contributions aux connaissances scientifiques sont les suivantes :

- Une méthode d'identification et de quantification des dérives d'usages environnementales liées aux utilisations d'un produit par différents segments d'utilisateurs. Cette méthode permet de tirer des conclusions quant aux conséquences des incertitudes liées à la diversité des usages sur les performances environnementales globales du cycle de vie du produit (incluant la durée de vie du produit comme l'une de ces performances).
- Une étude sur la pertinence des stratégies d'intervention permettant d'influencer le comportement des utilisateurs et de l'orienter vers des pratiques écoresponsables. Y sont notamment comparés les impacts environnementaux additionnels créés par l'intégration au produit des composants permettant de mettre en oeuvre la stratégie et les impacts environnementaux évités par ladite stratégie.
- Une méthode d'éco-optimisation pour la conception détaillée de produits, centrée sur les aspects liés aux utilisateurs pour favoriser l'attractivité du produit. La méthode inclut une démarche innovante de définition de l'objectif d'optimisation passant par la réalisation d'une démarche QFD.
- Une méthode pour la sélection d'alternatives de conception simultanée à l'optimisation globale de la modélisation d'un produit et de son cycle de vie. La simultanéité de ces deux tâches permet de réduire les incertitudes quant au choix d'une solution en phase de conception amont.

Les outils et méthodes développés au cours du travail de thèse ont prouvé leur efficacité au cours des expérimentations menées sur les cas d'études. Cependant, afin d'assurer de la pertinence et de l'efficacité de ces méthodes, il reste nécessaire de les appliquer à une plus grande diversité de cas, d'en retirer des retours d'expériences et d'analyser les résultats obtenus en comparaison avec d'autres méthodes traditionnelles.

Outre la nécessité d'une plus grande diversité d'applications, une perspective des travaux menés serait le regroupement des méthodes développées au sein d'un logiciel permettant d'automatiser au maximum le processus de modélisation. L'intégration dans ce logiciel d'un module ACV faciliterait l'expression des performances environnementales des différents éléments du modèle et éviterait les allers et retours entre logiciels. L'ensemble des méthodes serait alors beaucoup plus facilement accessible aux ingénieurs et concepteurs souhaitant l'expérimenter.

Références

- Azapagic, A., Clift, R., 1999. The application of life cycle assessment to process optimisation. *Computers & Chemical Engineering* 23, 1509–1526.
- Azapagic, Adisa, Clift, R., 1999a. Life cycle assessment and multiobjective optimisation. *Journal of Cleaner Production* 7, 135–143.

- Azapagic, Adisa, Clift, R., 1999b. Life cycle assessment as a tool for improving process performance: a case study on boron products. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 4, 133–142.
- Bhamra, T., Lilley, D., Tang, T., 2008. Sustainable use: changing consumer behaviour through product design. *Changing the Change: Design Visions, Proposals and Tools*, Turin, 2008, Proceedings.
- Elias, E.W.A., Dekoninck, E.A., Culley, S.J., 2008. Assessing user behaviour for changes in the design of energy using domestic products, in: *Electronics and the Environment*, 2008. ISEE 2008. IEEE International Symposium on. IEEE, pp. 1–6.
- Lilley, D., 2009. Design for sustainable behaviour: strategies and perceptions. *Design Studies* 30, 704–720. doi:10.1016/j.destud.2009.05.001
- Lockton, D., Harrison, D., Stanton, N., 2008. Making the user more efficient: design for sustainable behaviour. *International Journal of Sustainable Engineering* 1, 3–8. doi:10.1080/19397030802131068
- Pieragostini, C., Mussati, M.C., Aguirre, P., 2012. On process optimization considering LCA methodology. *Journal of Environmental Management* 96, 43–54.
- Pugh, S., 1991. *Total design: integrated methods for successful product engineering*. 1990.
- Serna-Mansoux, L., Popoff, A., Millet, D., 2014. A Simplified Model to Include Dynamic Product-User Interaction in the Eco-Design Process. *Journal of Industrial Ecology* 18, 529–544. doi:10.1111/jiec.12160
- Wever, R., Kuijk, J. van, Boks, C., 2008. User-centred design for sustainable behaviour. *International Journal of Sustainable Engineering* 1, 9–20. doi:10.1080/19397030802166205

Chapitre 2. Contexte et problématique de recherche

Introduction générale : enjeux et défis de l'écoconception et des comportements écoresponsables

Le XXIème siècle est d'ores et déjà le théâtre de défis importants liés à la rencontre des modes d'existence des sociétés modernes avec les contraintes planétaires globales en matière d'impacts environnementaux et de finitude des ressources naturelles. Il appartient aux générations présentes et futures de relever ces défis. Dans ce document, nous abordons ces problématiques globales par le prisme d'une discipline particulière : la conception de produit. Dans les paragraphes suivants, nous allons voir dans quelle mesure la conception de produit joue un rôle sur l'échiquier mondial du développement durable et comment, en faisant la transition de la conception traditionnelle à l'écoconception moderne, elle doit aider à sa réalisation.

Les objectifs d'une démarche d'écoconception sont d'arriver à un niveau soutenable d'impacts environnementaux et sociaux engendrés par l'ensemble du cycle de vie du produit qui en fait l'objet, tout en respectant la viabilité économique de son business model. Selon les produits, ces démarches doivent être associées à des comportements écoresponsables et volontaires de la part des utilisateurs, de manière à garantir les performances environnementales du produit.

Pour l'utilisateur, avoir conscience que tous les objets qui nous entourent sont fabriqués à partir d'un stock fini de matières premières à partager entre tous les habitants de la planète est une première étape vers la réalisation d'un comportement écoresponsable. Si l'énergie est souvent la plus médiatisée lorsqu'il est question d'écoconception (avec les campagnes de prévention sur les économies d'énergies par exemple), les autres ressources naturelles présentent aussi, pour certaines, des problématiques de plus en plus contraignantes. Tout comme il existe sur le système « Terre » une quantité finie d'énergie disponible (toute forme d'énergie étant issue du rayonnement solaire et de la gravitation), il existe également des quantités de matières finies. Ces ressources sont dites renouvelables si elles s'inscrivent dans des cycles naturels dont la période est plus courte que l'espérance de vie humaine moyenne (cycle de l'eau, cultures annuelles, élevages, etc.). Au contraire, si elles s'inscrivent dans des cycles longs, ces ressources sont dites non renouvelables (des dizaines de millions d'années de formation sont nécessaires à l'apparition du pétrole et du charbon, qui sont donc non renouvelables). La figure 2 ci-dessous donne un aperçu de ressources qui, dans une même catégorie, peuvent être renouvelables ou non renouvelables selon le type d'exploitation qui en est fait.

Ce constat doit poser les objectifs du futur en matière de consommation de ressources naturelles. Il n'est simplement pas soutenable de baser le fonctionnement de nos sociétés sur l'exploitation toujours plus intensive de stocks finis de ressources non renouvelables. Un équilibre doit être respecté entre nos flux de consommation et les flux de production de ressources renouvelables dont la Terre est capable. Bien que les contraintes techniques et économiques actuelles poussent l'industrie à une transition vers les énergies renouvelables et l'écologie industrielle, l'inertie du système basé sur

l'extraction des ressources non renouvelables est extrêmement forte. Malheureusement pour ce système, pour la plupart des métaux et des matériaux de construction, les gisements actuellement exploités, les plus concentrés, se tarissent et les nouveaux gisements découverts sont, sauf rares exceptions, systématiquement de moins en moins concentrés.

Cela se traduit en coûts et en dépenses énergétiques toujours plus importants pour extraire une quantité donnée de ressource, engendrant progressivement des tensions économiques et sociales de plus en plus fortes (on peut citer en exemple la chaîne de problématiques liées au prix de l'essence qui a des répercussions sociales directes). Lorsque les problématiques techniques, économiques et sociales liées à l'utilisation d'une ressource deviennent trop importante, les chercheurs et les industriels s'orientent soit vers des ressources de substitution soit vers de nouvelles manières de fournir des quantités de ressource suffisantes, par exemple avec l'utilisation de filières de recyclage.

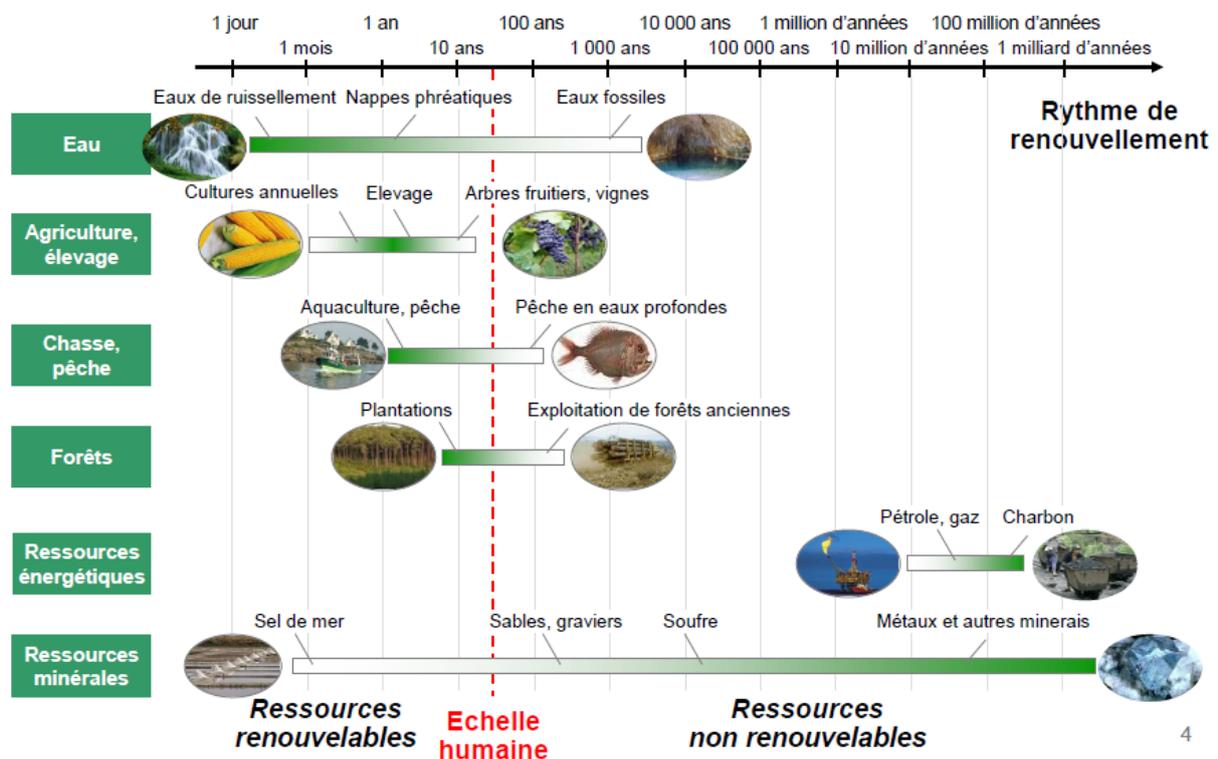


Fig. 2. Ressources renouvelables et non renouvelables selon une échelle de temps humaine (Bihoux et De Guillebon, 2013).

Selon les ressources nécessaires au processus de recyclage et selon le stock disponible et les quantités demandées, une ressource non renouvelable peut se retrouver inscrite dans un cycle court, la rendant ainsi artificiellement renouvelable. C'est le principe du cycle de vie des produits selon lequel, après la fin de vie du produit, les matériaux qui le composaient serviront à la fabrication de nouveaux produits. L'objectif pour les matériaux recyclables doit donc être d'arriver à un équilibre entre offre et demande.

Du point de vue technique cela passe notamment par une suppression des usages dissipatifs (95% du titane extrait n'est pas récupérable car utilisé comme colorant, donc dispersé et perdu avec les

produits) et par une limitation des pertes fonctionnelles liées au recyclage (un stock où sont mélangés verre transparent et verres colorés ne pourra pas être recyclé en verre transparent et perdra donc en niveau de fonctionnalité). La figure 3 montre pour chaque élément du tableau de Mendeleïev le taux de recyclage actuel et explicite ainsi les efforts importants à fournir. L'écoconception agit en préventif sur ces problématiques en incitant par exemple à n'utiliser qu'un seul matériau (et le plus pur possible) pour chaque sous ensemble démontable d'un produit.

C'est la question du recyclage que nous venons d'évoquer qui pose la grande différence entre matières et énergies : les matières, comme le cuivre, bien que non renouvelable, peuvent être longtemps recyclées au sein de notre système industriel alors que les énergies, comme le pétrole, non renouvelable également, perdent leur intégrité physique au cours de leur utilisation et ne sont pas récupérables.

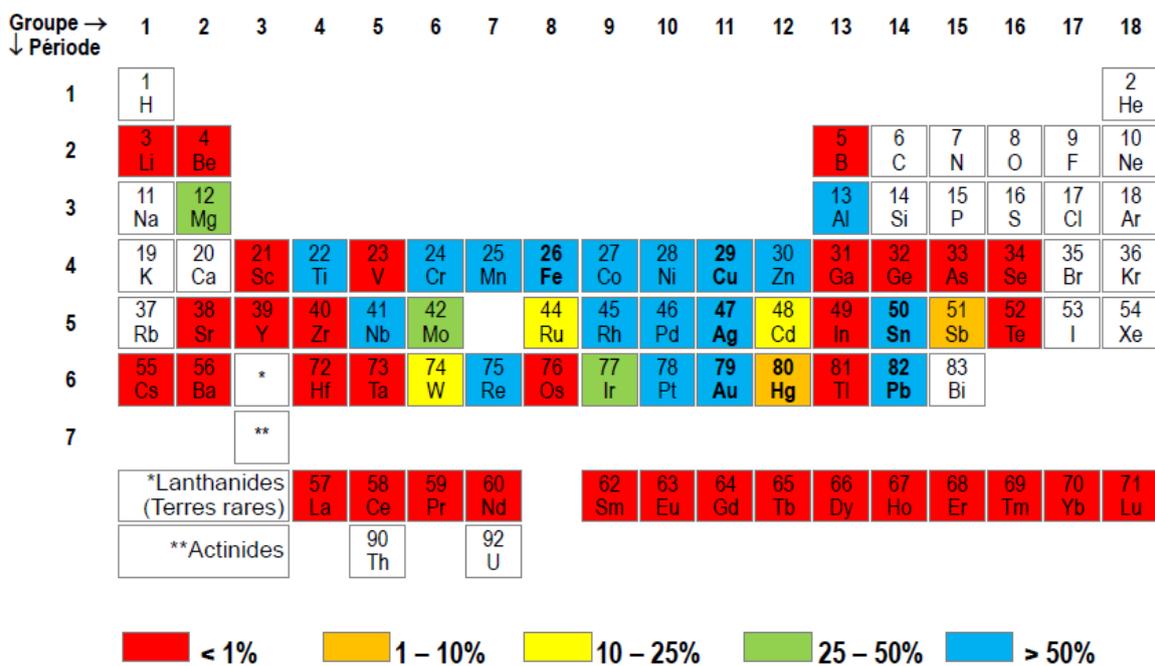


Fig. 3. Taux de recyclage des métaux (Reuter et al., 2013)

Le concept de Développement Durable

Un état est dit « durable » si « les composantes de l'écosystème et leurs fonctions sont préservées pour les générations présentes et futures » (AFNOR, 2012)

« Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. (Brundtland, 1987) Deux concepts sont inhérents à cette notion :

- le concept de « besoins », et plus particulièrement des besoins essentiels des plus démunis, à qui il convient d'accorder la plus grande priorité ;
- l'idée des limitations que l'état de nos techniques et de notre organisation sociale impose sur la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir. »

Dans le temps : nous avons le droit d'utiliser les ressources de la Terre, mais le devoir d'en assurer la pérennité pour les générations futures.

Dans l'espace : chaque humain a le même droit aux ressources naturelles de la Terre (principe de destination universelle des biens).

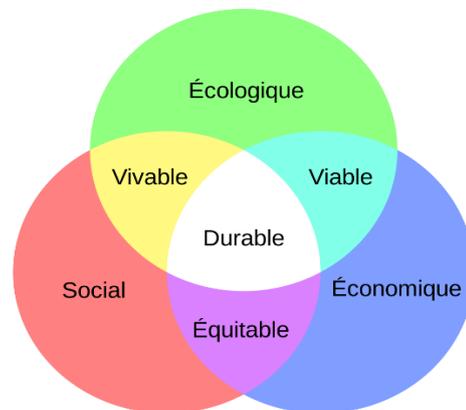


Fig. 4. Diagramme du développement durable

Les questions énergétiques occupent souvent une place centrale dans la communication autour du développement durable et de l'écoconception. Il est donc primordial que chacun possède les clés de réflexion lui permettant d'appréhender objectivement les tenants et les aboutissants de ces problématiques complexes. Dans un premier temps, savoir que chacune de nos actions nécessite une dépense d'énergie, soit fournie par notre corps et donc par notre alimentation et l'industrie agroalimentaire sous-jacente, soit fournie par un produit qui a dû être fabriqué (grille-pain, voiture, chauffe-eau, etc.) et alimenté par des centrales (alimentées par des sources majoritairement non renouvelables), doit permettre d'adopter une vision plus responsable de nos modes de vie.

En physique, l'énergie est définie comme « la capacité d'un système à produire un travail ». C'est une grandeur qui caractérise l'état d'un système et qui est d'une manière globale conservée au cours de ses transformations. L'énergie caractérise donc les transformations du monde, de la dérive des continents au trajet que nous faisons pour rejoindre notre lieu de travail, de la température des océans à la cuisson de notre repas du soir. L'existence même de notre planète, de même que nos vies, ne sont que suites de changements et de transformations et sont donc des transferts permanent d'énergies entre différents systèmes. Nous parlons ici de transferts d'énergie et non de consommations car comme le dit la définition, l'énergie est conservée au cours des transformations : « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ».

Dans une voiture, on ne consomme pas de carburant, on le transforme en gaz et en chaleur puis en quantité de mouvement. L'énergie qui était stockée dans le carburant fossile est restituée sous forme d'énergie mécanique, calorifique, de vaporisation, etc. Aussi dans une voiture, il est surtout intéressant de convertir l'énergie du carburant en énergie mécanique pour déplacer le véhicule. Un des grands défis des écoconcepteurs est alors de minimiser les « pertes » d'énergies (ou plutôt minimiser les transformations d'énergies qui n'aident pas à faire avancer la voiture) en améliorant le rendement du véhicule et faire en sorte qu'un litre de carburant permette de parcourir la plus grande distance possible.

Tous les domaines des activités humaines sont concernés par ces questions énergétiques dès qu'il est question de : modifier une vitesse (transports, etc.), modifier une température (chauffage, réfrigération, etc.), modifier une forme (extraction, usinage, recyclage, etc.), créer une réaction chimique (industrie chimique, etc.), interagir avec des champs magnétiques (gravitation, moteur électrique, etc.), changer une composition atomique (industrie nucléaire, etc.), transférer du rayonnement à de la matière (four à micro-ondes, smartphones, etc.). Compter l'énergie, c'est donc compter la transformation du monde qui nous entoure, et c'est aussi compter l'activité économique mondiale dont tous les secteurs sont liés à l'énergie.

Si l'on considère la planète Terre comme un système clos, la loi de conservation de l'énergie dicte que toute activité humaine doit utiliser une énergie primaire déjà présente dans l'environnement (charbon, pétrole, gaz, uranium, hydraulique, éolien, solaire, biomasse, etc.). L'électricité que nous consommons est en fait une transformation d'une énergie primaire en énergie secondaire via une centrale adaptée, là aussi avec un rendement plus ou moins performant et des pertes et pollutions plus ou moins importantes.

Du point de vue économique, les énergies primaires sont gratuites, ce sont les travaux humains nécessaires à leur transformation en énergies secondaires (par le biais de centrales, raffineries, etc.) qui créent les premiers coûts de l'énergie que nous utilisons (viennent ensuite transport, distribution, taxes, etc.). Sachant cela, il est facile de comprendre que les énergies très concentrées et facilement stockables (charbon, pétrole, gaz et uranium) ont été le moteur de la croissance économique depuis

la première révolution industrielle car nécessitant peu de travail humain et donc peu de coût par rapport aux quantités d'énergies produites. De toutes les ressources énergétiques, c'est le pétrole qui nécessite le moins de travail et d'infrastructures pour produire 1kWh d'énergie (Vidal, 2014). Cela explique, encore aujourd'hui, la prédominance des énergies fossiles dans le mix mondial (figure 5).

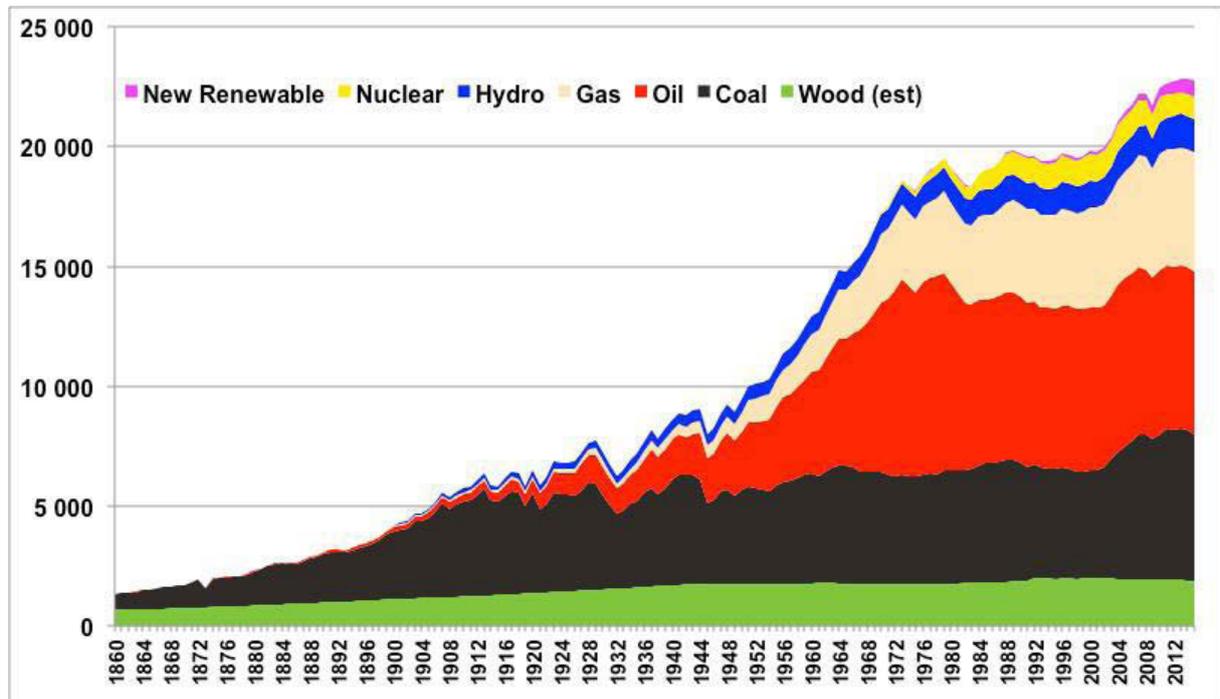


Fig. 5. Consommation d'énergie par personne en kWh par an, moyenne mondiale (IEA, 2016).

A l'inverse, les énergies intermittentes et diffuses (vent et soleil), difficilement stockables, de par l'importante quantité de travail nécessaire à leur collecte et à leur stockage (entraînant des coûts irrémédiablement plus élevés pour un kWh produit), n'ont que très peu été utilisées avant que les impératifs du développement durable ne commencent à être entendus.

Aujourd'hui pourtant, la transition énergétique demande de passer d'un système où l'énergie fossile est concentrée et facile à stocker à un système où les énergies renouvelables sont diffuses et difficiles à stocker ; il en résulte une difficulté de mise en œuvre importante pour l'ensemble des acteurs, expliquant la grande inertie du processus. Autre inconvénient de devoir capter des énergies diffuses : la production d'électricité renouvelable demande davantage de ressources à la fabrication (de même que certaines ressources plus rares) que les centrales à ressource fossile. Dans un contexte de diminution des quantités de métaux et autres ressources disponibles, la transition vers ces modes de productions se heurte à de fortes contraintes techniques et économiques, voire géologiques.

La période des énergies fossiles n'est en réalité qu'une brève parenthèse de l'histoire humaine qui auparavant ne s'appuyait que sur des énergies renouvelables (moulins à vent et à eau, bateaux à voiles, etc.). Cette exploitation des fossiles et les progrès technologiques simultanés ont permis en quelques

décennies de passer de sociétés agricoles aux sociétés industrielles et tertiaires que nous connaissons aujourd'hui (un tracteur remplace des dizaines de travailleurs agricoles, entraînant un exode rural ; une machine remplace des dizaines d'ouvriers, entraînant une tertiarisation de l'économie).

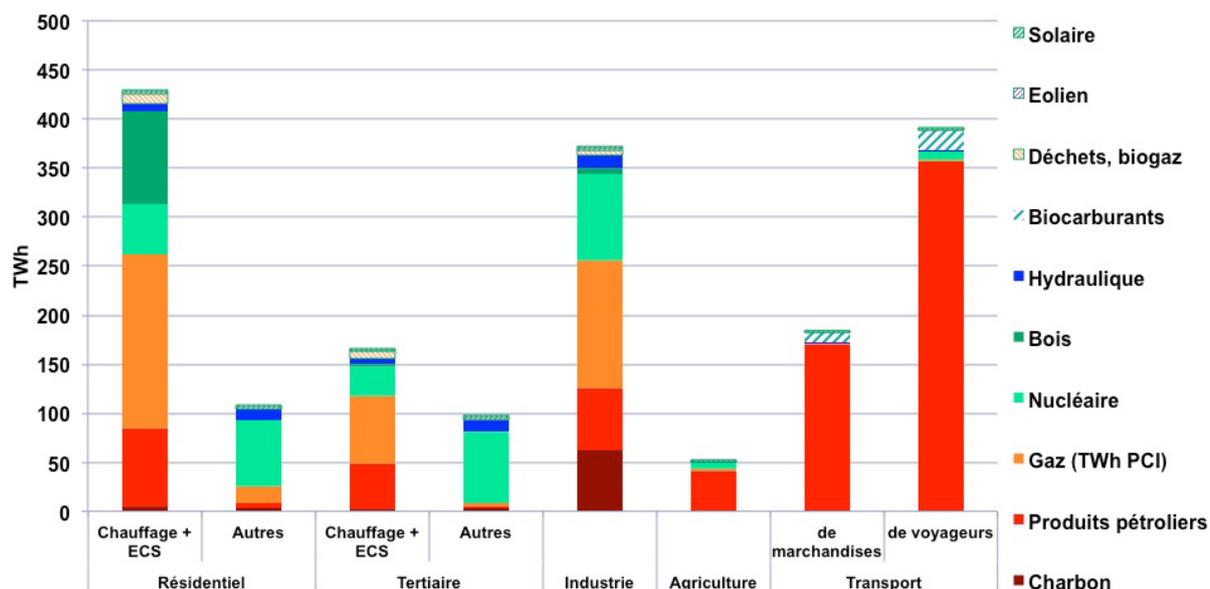


Fig. 6. Répartition de la consommation d'énergie finale en France en 2012 (Jancovici, 2015).

L'un des défis du XXIème siècle est le retour à ces mêmes énergies renouvelables tout en conservant une production énergétique suffisante au maintien des niveaux de vie modernes¹. C'est dans cette optique que s'inscrivent notamment les objectifs européens 2020 et 2050 pour le climat avec un point concernant l'amélioration de l'efficacité énergétique (problématique récurrente des problèmes d'écoconception) et un point sur l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix européen. La figure 6 ci-dessus donne un aperçu des efforts à réaliser selon les secteurs d'activités : la priorité du secteur résidentiel doit être l'amélioration de l'efficacité thermique des bâtiments, la priorité du secteur des transports doit être la réduction de la consommation de pétrole, etc. Ces objectifs et les efforts associés sont d'une grande importance, d'après Andrae et Edler (2015), ils permettraient de conserver une consommation d'électricité globalement stable dans le secteur des technologies de l'information (occupant une part importante des colonnes « autres » dans la figure 6), pourtant en forte croissance, d'ici à 2030. Sans ces efforts d'amélioration des performances énergétiques et de consommation raisonnée, la consommation de ce même secteur pourrait être multipliée par cinq, engendrant du même coup une importante augmentation des impacts environnementaux associés (figure 7).

¹ Ceux qui pensent que nos modes de vie ne sont pas soutenables par l'utilisation des énergies renouvelables seules prônent le concept de décroissance, avec un retour à une économie davantage primaire et secondaire

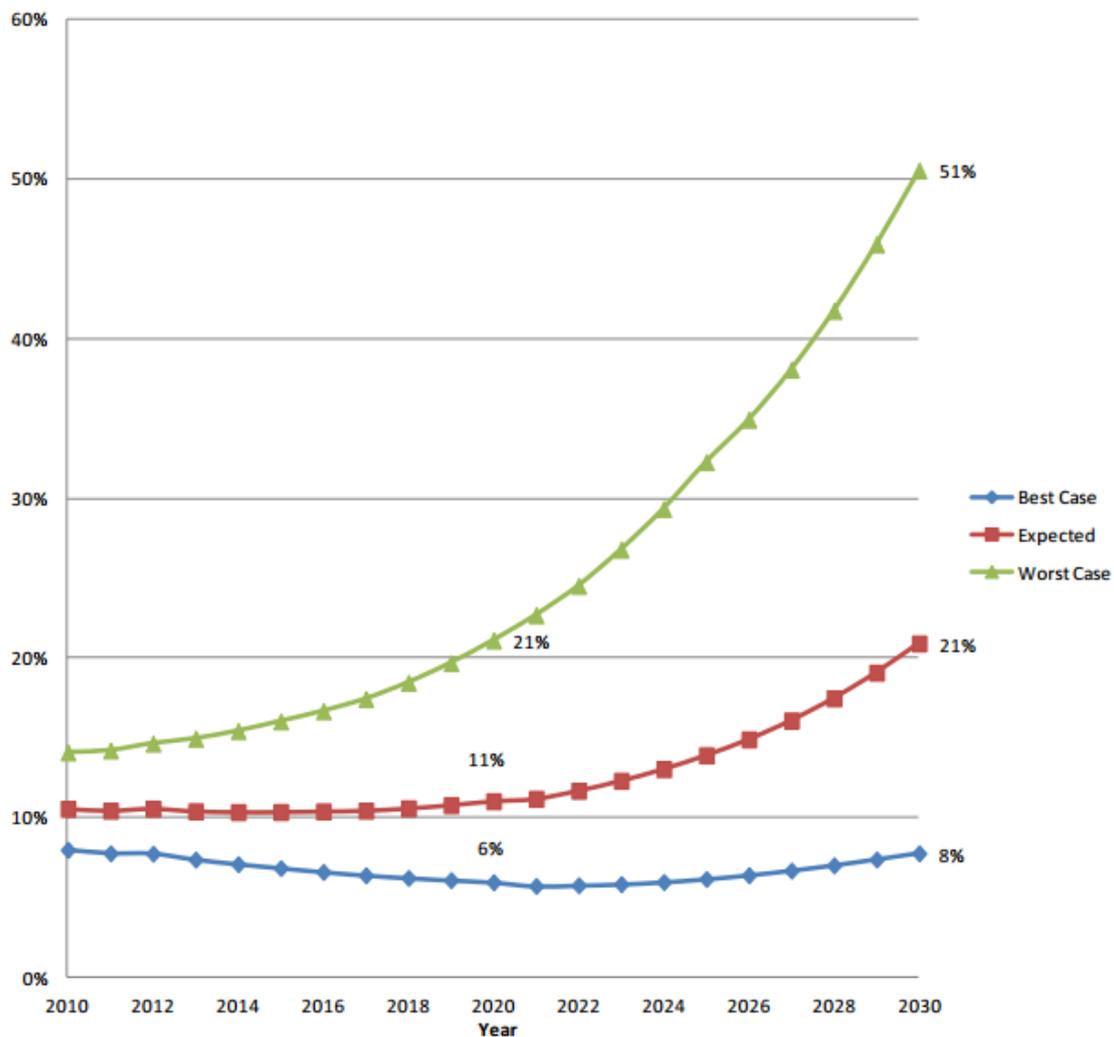


Fig. 7. Part de l'utilisation des technologies de l'information dans la consommation globale d'électricité à l'horizon 2030 (Andrae et Edler, 2015).

Malgré les connaissances de plus en plus étoffées sur les problématiques du développement durables auxquelles s'ajoutent des normes de plus en plus solides pour assister les écoconcepteurs dans leur tâche, trouver la manière juste d'écoconcevoir un produit reste un problème difficile. Incertitudes sur la phase d'utilisation, effets rebond, manque de visibilité sur la disponibilité des ressources, manque de filières de fin de vie adaptées, *business models* contraignants, etc. : la vision globale qui permettrait de faire les bons compromis peut être très dure à éclaircir. Philippe Bihoux (2014) cite en exemple le cas de voitures écoconçues pour consommer moins de carburant tout en gardant les mêmes performances de confort et de sécurité. Pour ce faire, un axe de travail des ingénieurs a été d'alléger la structure des véhicules grâce à l'utilisation d'aciers innovants à hautes performances. Ces aciers nécessitent un alliage de très bonne qualité utilisant de nombreux adjuvants. D'une part, cela exclu l'utilisation de l'acier issu des filières de recyclage car sa pureté n'est pas suffisante et, d'autre part, cela consomme les stocks d'adjuvants, des métaux non ferreux, qui ne pourront pas être récupérés. Un tel produit ne peut donc être considéré comme soutenable que sur un certain nombre d'indicateurs

ne prenant pas en compte la globalité des problématiques que nous avons évoquées, notamment la question de la gestion raisonnée des ressources.

Un défi des écoconcepteurs est donc de concevoir des produits sobres en consommations de matières et d'énergies (dans la limite des stocks renouvelables alloués) tout en parvenant à des niveaux de fonctionnalité attractifs. Lorsque les métiers de la conception se heurtent à la réalité des ressources il n'est plus possible d'ajouter des composants pour faire un meilleur produit, il faut faire un produit acceptable (cette notion étant très dépendante du caractère soutenable des utilisateurs) avec moins de ressources. Ce sont ces principes directeurs que l'on trouve dans des concepts tels que le *Lean manufacturing* ou les *Low Technologies* (Bihouix, 2014). Ces dernières proposent notamment de commencer toute réflexion en conception par une remise en cause des besoins des utilisateurs. Ce faisant, il est possible de se concentrer sur l'essentiel de ce pourquoi le produit est fait et d'éviter l'ajout de fonctions non indispensables, voire inutiles, qui gaspilleraient des ressources.

La communication des acteurs écologistes, dès lors qu'il s'agit des questions d'économies d'énergies et de ressources, pointe le plus souvent les désastres écologiques liés aux activités humaines de manière à créer un sentiment de culpabilité sensé responsabiliser ses cibles. Cependant, il est crucial de comprendre qu'au-delà des seuls dégâts environnementaux, c'est la viabilité même de nos sociétés au sein de leur environnement qui est en fait remise en question. Sur la question des émissions de CO₂ principalement liées à l'utilisation des carburants fossiles, certains experts comme Yvo de Boer (secrétaire exécutif de la Convention Cadre sur le Changement Climatique aux Nations Unies de 2006

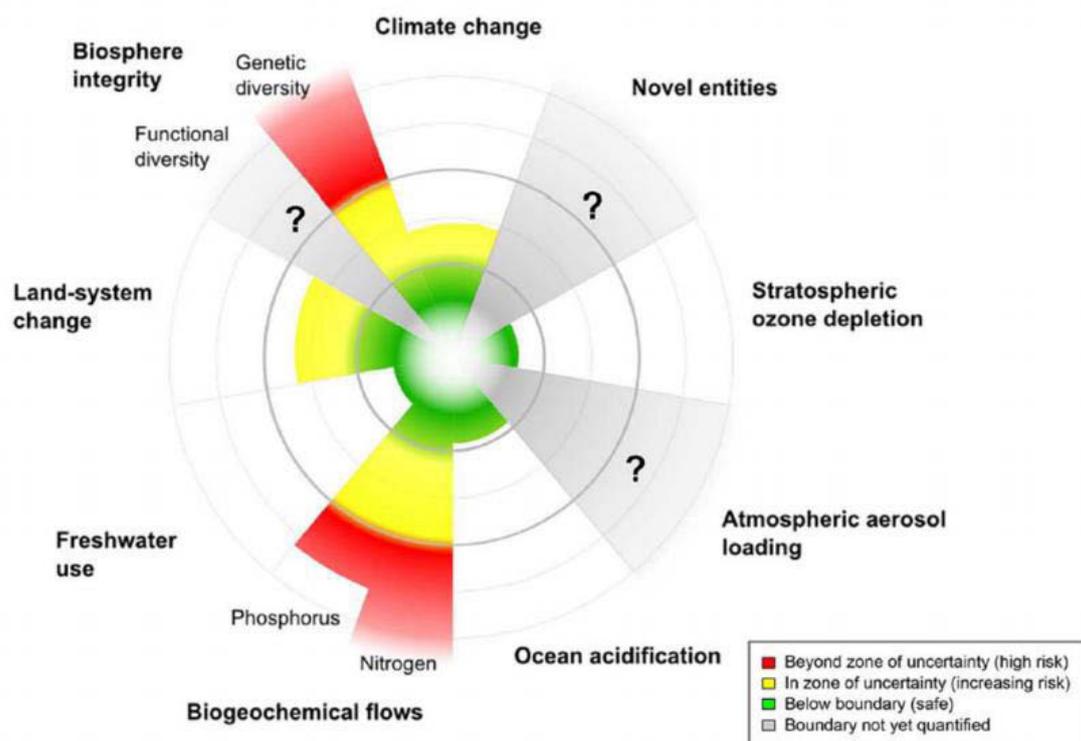


Fig. 8. Limite planétaire et état actuel pour plusieurs indicateurs environnementaux cruciaux (Steffen et al., 2015)

à 2010) affirment que l'objectif acté par la COP21 de limiter le réchauffement à +2° est d'ores et déjà hors d'atteinte. Il souligne du même coup l'urgence à agir pour limiter ce réchauffement. Bien que monopolisant l'attention médiatique, Steffen et al. (2015) montrent que le problème du CO₂ n'est pas nécessairement le plus préoccupant pour l'avenir de la planète. D'après leurs travaux, les dégâts sur la biodiversité et les perturbations des cycles du phosphore et de l'azote ont d'ores et déjà atteint des seuils critiques pour la viabilité future de nos sociétés (voir figure 8).

Concernant les conséquences du réchauffement, l'humanité réalise une expérience inédite, grandeur nature, dont les résultats précis sont impossibles à prévoir. Les seules modélisations possibles sont de l'ordre macroscopique sur les changements climatiques globaux et sur leurs hypothétiques effets locaux. Il est tout de même possible de se rendre compte de la violence de l'expérience que nous menons en nous intéressant à la dernière ère glaciaire terrestre. Celle-ci s'est déroulée entre -110 000 et -10 000 avec une période de déglaciation allant de -20 000 à -10 000 et se soldant par une hausse des températures d'environ 4 °C (en moyenne mondiale) et une élévation du niveau marin d'environ 130 mètres. Ces 4 °C d'augmentation en 10 000 ans, qui ont donné le monde que nous connaissons aujourd'hui, sont à mettre en parallèle avec les 2 à 5 °C d'augmentation que la Terre risque de connaître en un peu plus d'un siècle à cause des activités humaines... Au cours de cette dernière ère glaciaire, il est estimé que les ressources disponibles sur le continent Européen permettaient de nourrir environ 100 000 personnes (Jancovici, 2015).

Nous voyons donc qu'une différence moyenne de 4 °C entraîne des conséquences immenses à grande échelle (figure 9). Ces changements vont dans de nombreux endroits porter atteinte aux rendements agricoles, aux écosystèmes installés, entraîner des variations de la biodiversité microbienne et des populations d'agents pathogènes, générer des augmentations d'intensité des phénomènes météorologiques convectifs, de même qu'une élévation du niveau des mers, une acidification des océans, une perturbation des grands courants marins, etc. La liste des effets est longue et pour chacun les conséquences sont difficilement prévisibles. Aujourd'hui, les ressources alimentaires que nous ne détruisons pas par nos surconsommations pourraient bien être les victimes de ces effets, entraînant du même coup de graves tensions économiques, politiques et sociales.

Nos efforts doivent aller vers l'équilibrage de nos utilisations de ressources avec les ressources disponibles de manière renouvelable, soit par voies naturelles, soit par voie de recyclage. Cela passe par une préservation des ressources grâce à l'amélioration de l'efficacité des processus industriels quant aux consommations de matières et d'énergies. Cela passe par l'adoption de modes de vie plus responsables où

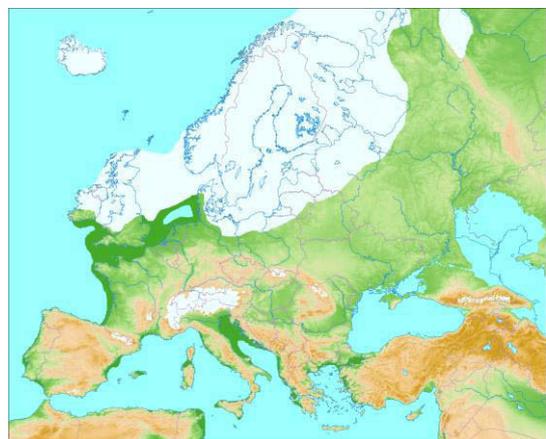


Fig. 9. L'Europe au dernier maximum glaciaire, il y a 20 000 ans (Ehlers et al., 2011)

les arbitrages liés à nos actions du quotidien sont guidés par les impératifs environnementaux. Cela passe par la préservation de la biodiversité et de la productivité des sols, notamment en limitant les changements climatiques déjà amorcés.

Ces grands principes se retrouvent dans le concept de l'écoconception qui prône l'utilisation de ressources renouvelables, la minimisation des impacts environnementaux et l'information à destination de l'utilisateur quant aux enjeux environnementaux liés à ses actions. Ce principe d'information est la première étape vers une prise de conscience et un respect des contraintes environnementales et sociales. La minimisation des impacts passe par l'amélioration de l'efficacité, c'est-à-dire l'amélioration des rendements énergétiques et la réduction des déchets. Ce dernier point est central dans les concepts d'économie circulaire et d'écologie industrielle où la notion de déchet devient caduque : tout ce qui est rejeté par une activité doit pouvoir devenir une ressource pour une autre activité.

Du point de vue économique, transiter vers une économie des ressources renouvelables doit permettre de sécuriser le système en évitant les « investissements non soutenables » (investir toujours plus pour se procurer des ressources toujours plus rares). Selon l'importance de la ressource en question, ce processus peut devenir extrêmement dangereux et mener à un effondrement économique et sociétal de grande ampleur (Tainter, 1990). Les ressources énergétiques fossiles sont à ranger dans cette catégorie.

Pour mener à bien leurs objectifs de réduction d'impacts, les écoconcepteurs peuvent s'appuyer sur une multitude de principes et d'outils qui ont été développés par leurs pairs. Citons en premier lieu le choix de matériaux à faibles impacts, non toxiques et produits de manière soutenable ; le choix de procédés à haut rendements énergétiques ; l'utilisation d'outils d'analyse du cycle de vie (ISO 14040 ; Rödger et al., 2016) ; l'utilisation de normes et de guidelines (Ecodesign Pilot de Wimmer et Züst, 2003 ; Strasser et al., 2003) ; la prise en compte de la fin de vie avec le « design for recycling, remanufacturing and reuse » (Krystofik et al., 2015 ; Yang et al., 2015) ; la prise en compte des aspects émotionnels avec le « emotionally durable design (Chapman, 2015 ; Cooper, 2016) » ; le biomimétisme (Cohen et Reich, 2016 ; Wang et al., 2016) ; les systèmes produit-service ou économie de fonctionnalité (Joore et Brezet, 2015 ; Piscicelli et al., 2015) ; le retour à une échelle locale, comme dans le cas de l'écologie industrielle (Dandara et al., 2016 ; Lenn, 2015) ; etc.

Pour terminer cette introduction générale, il est intéressant de prendre connaissance du *Bill of Rights for the Planet* rédigé par William McDonough Architects pour l'EXPO 2000 de Hannovre. Bien qu'issus du milieu de l'architecture, les points qu'ils soulèvent trouvent des résonances beaucoup plus globales et transversales qui peuvent servir de guide dans un grand nombre d'activité humaines :

- insister sur le droit de l'humanité et de la nature à coexister dans des conditions saines et durables ;

- reconnaître les interdépendances entre les conceptions (les créations) humaines qui interagissent avec et dépendent du monde naturel dans des implications variées et à large échelle. Elargir les considérations en conception afin de reconnaître même les effets lointains ;
- respecter les relations entre matière et esprit. Considérer tous les aspects de l'installation humaine en incluant la communauté, l'habitat, l'industrie et les échanges en matière de connexions entre conscience spirituelle et matérielle ;
- accepter la responsabilité des conséquences issues de décisions en phase de conception sur le bien-être humain, la viabilité des écosystèmes et leur droit à coexister ;
- créer des objets sûrs et avec une valeur à long terme. Ne pas encombrer les générations futures avec des exigences de maintenance ou d'administration complexe des dangers potentiels dus à des conceptions de produits, process ou normes mal optimisés ;
- supprimer la notion de déchet. Evaluer et optimiser le cycle de vie complet des produits et procédés, approcher l'état des écosystèmes dans lesquels les déchets n'existent pas ;
- s'appuyer sur des flux d'énergies naturelles. Les conceptions humaines doivent, tout comme le monde du vivant, tirer leur forces du perpétuel apport solaire. Incorporer cette énergie efficacement et de manière sûre pour une utilisation responsable ;
- comprendre les limites de la conception. Aucune création humaine n'est éternelle et la conception ne résout pas tous les problèmes. Ceux qui créent et planifient doivent faire preuve d'humilité face à la nature ; traiter la nature en modèle et en mentor, non en tiers dérangeant qui doit être évité ou contrôlé ;
- rechercher constamment l'amélioration par le partage de la connaissance. Encourager la communication directe et ouverte entre collègues, supérieurs, fabricants et utilisateurs pour créer un lien de long terme entre considérations de soutenabilité et responsabilité éthique. Rétablir la relation complète entre les processus naturels et l'activité humaine.

Le but de cette introduction est d'ouvrir l'esprit aux immenses défis qui se présentent face à nous et qu'il nous faut relever dans l'espoir d'assurer le meilleur futur possible aux générations qui nous succéderont. Maintenant que ce contexte global a été posé et a motivé notre envie d'agir positivement pour l'avenir de la planète, intéressons-nous plus en détails, dans les chapitres suivants, aux moyens déjà en place, en préparation et pressentis pour nous diriger vers cet objectif de soutenabilité.

Contexte de recherche

L'écoconception : un nouveau pilier de la recherche académique et des activités industrielles et commerciales

De par l'importance des enjeux environnementaux, sociaux et économiques cités en introduction, l'écoconception, c'est-à-dire l'intégration des considérations environnementales au sein des processus de conception de produits et de services, s'est affirmée au cours des dernières décennies comme un domaine de recherche transversal prolifique et comme un secteur d'activité en plein essor. Charter et Tischner définissent l'écoconception de la manière suivante : « les systèmes soutenables sont les produits, les services, les hybrides produit-service ou les évolutions systémiques qui minimisent les impacts négatifs et maximisent les impacts positifs - économiques, environnementaux, sociaux et éthiques – tout au long et au-delà du cycle de vie des produits et solutions existant, tout en répondant à des besoins sociétaux acceptables. »

De nombreux laboratoires intègrent aujourd'hui des axes de recherches orientés vers les problématiques du développement durable qui, globalement, touche plus ou moins directement la quasi-totalité des sujets de recherche appliquée. Du côté industriel, beaucoup de grandes entreprises disposent de bureaux d'études spécialisés dans la performance environnementale de leurs produits, process de production et/ou *business models*. Une multitude de bureaux d'études et de consultants indépendants permettent aux entreprises qui ne disposent pas d'un service dédié de sous-traiter ces tâches d'analyse et de calcul.

L'implication du secteur industriel comme acteur du développement durable est en partie due à la contrainte des accords internationaux et des normes de plus en plus riches dans tous les secteurs d'activités (voir figure 10). Plus que de simples contraintes, les normes, et surtout l'anticipation des normes (c'est-à-dire l'anticipation des contraintes futures notamment liées aux problèmes environnementaux), peuvent être vues par les chercheurs industriels comme des leviers

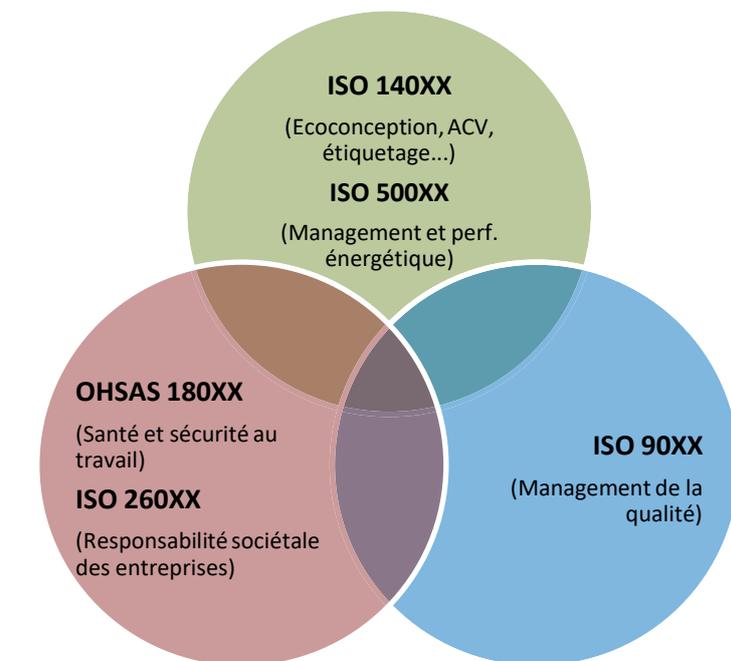


Fig. 10. Principales normes internationales autour du développement durable

d'innovation les poussant à améliorer au maximum l'efficacité de leurs produits, process et *business*

models. Dans ce contexte, chercheurs industriels et académiques travaillent ensemble dans le sens du progrès vers un développement durable.

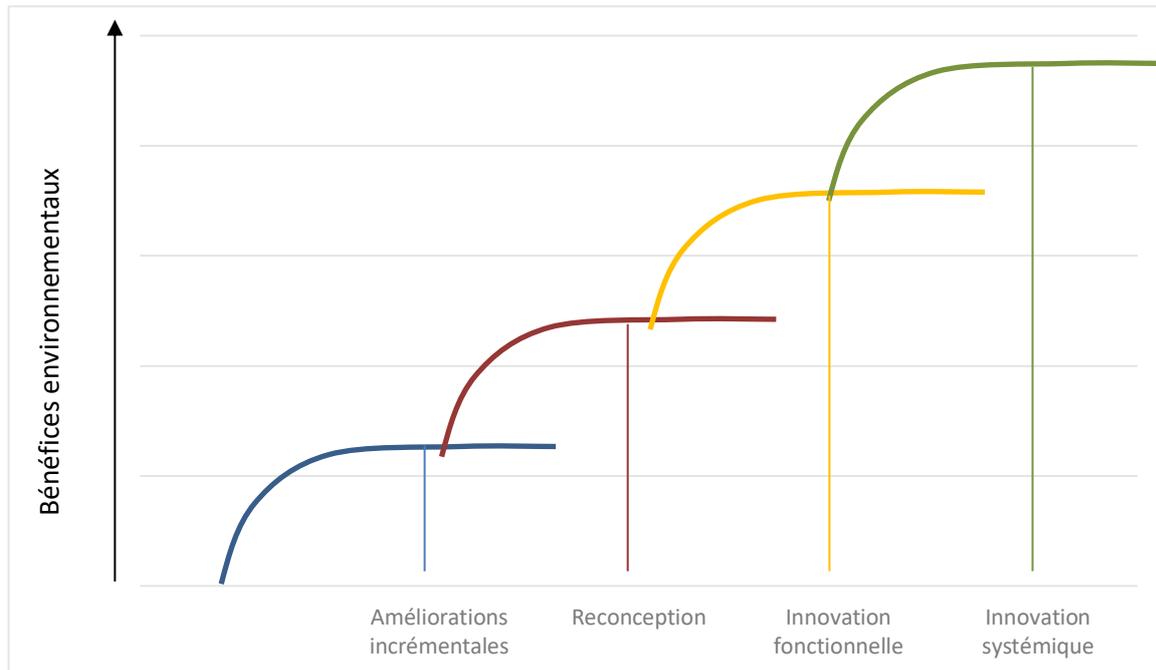


Fig. 11. Le modèle des quatre étapes de l'écoconception (Charter et Chick, 1997)

D'après des auteurs tels que Charter et Chick (1997) et Brezet et al. (1997), les plus grands gains environnementaux sont acquis lorsqu'un système est repensé en profondeur, avec comme fil conducteur les problématiques du développement durable. Cette approche globale s'oppose à une approche corrective qui consiste à corriger au mieux les imperfections d'un produit par l'apport de mesures correctives, d'ajouts de modules, de remplacement de composants, etc. Une approche corrective ne peut qu'agir en surface du système et n'intervient pas sur les problèmes de fond (figure 11).

Reconcevoir ou repenser totalement un système permet d'optimiser la conception dès les premières étapes et pour l'ensemble des sous-systèmes. C'est en revanche un processus long, nécessitant d'importantes ressources humaines et financières et donc hors de portée des entreprises n'ayant pas de budget recherche-innovation suffisant. Cette approche radicale peut également se retrouver en conflit avec les *business models* de certaines entreprises qui privilégie le *branding* et non le travail d'optimisation de la conception. Pour ces dernières, le défi des écoconcepteurs est de prouver que les seuls investissements en marketing ne suffisent plus à établir un *business model* durable (même économiquement parlant). Une stratégie d'écoconception optimisée y est désormais indispensable.

L'écoconception ne se limite pas aux frontières physiques du produit, elle inclue aussi des objectifs en matière de *business model*. Réduire les impacts environnementaux et améliorer l'éco-efficacité des produits ne sont pas que des objectifs désintéressés. La commercialisation de produits éco-responsables est aussi un moyen d'améliorer l'image de marque d'une entreprise auprès d'une diversité de clients potentiels. Il est cependant important de garder à l'esprit le caractère prépondérant

des contraintes environnementales au regard des objectifs marketing. On retrouve ici le caractère éthique de l'écoconception évoqué par Charter et Tischner : celle-ci ne doit pas être motivée par des objectifs purement commerciaux et dériver vers le *green washing*.

Un produit écoconçu se doit néanmoins d'être attractif afin d'être au plus largement vendu et d'avoir un impact environnemental positif sur son marché. Longtemps vus comme contraignants par les entreprises, les impératifs en matière d'éco-efficacité sont peu à peu devenus des arguments de choix décisifs pour certains consommateurs. Bien que cette transition ne soit pas encore générale, il semble que la conscience environnementale collective s'éveille et se renforce de plus en plus, comme le montre l'engouement pour l'alimentation biologique, les circuits courts, les textiles produits localement ou assurant le respect des employés, les produits recyclés et recyclables, etc.

Principes clés de l'écoconception de produits et de services

L'écoconception intègre une multitude de principes opérationnels qui ont été développés et éprouvés au fil du temps par les communautés de chercheurs académiques et industriels.

Le principe peut-être le plus fondamental de l'écoconception est la considération du cycle de vie complet du système étudié (figure 12). Ce principe consiste à prendre en compte non seulement la phase de fabrication du produit, mais également la phase préliminaire d'extraction des ressources, le transport et la distribution, l'utilisation et la maintenance et finalement la fin de vie du produit où les efforts doivent être fait pour avoir un maximum de circularité pour le produit lui-même, ses composants ou, *a minima*, les matériaux qui le composent.

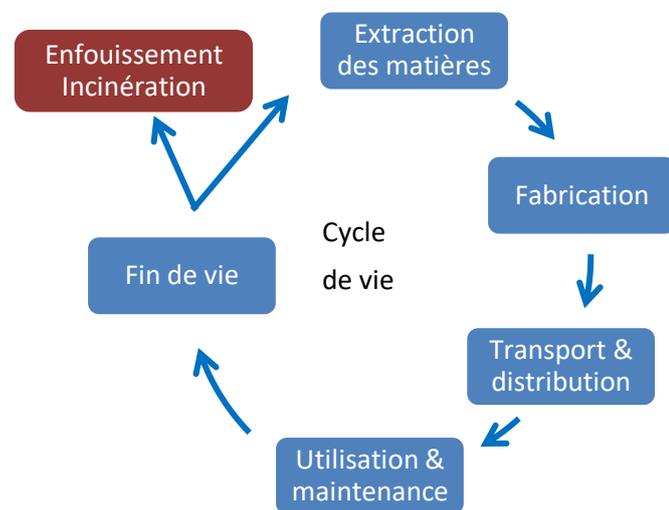


Fig. 12. Les étapes du cycle de vie d'un produit

Différents principes complémentaires viennent ensuite se greffer aux étapes du cycle de vie. L'une des problématiques fortes des projets d'écoconception est souvent la détermination de la durée de vie optimale du produit (van Nes et Cramer, 2006) : mieux vaut-il concevoir un produit à faible durée de vie mais facilement upgradable de manière à régulièrement améliorer son efficacité, ou mieux vaut-il concevoir un produit robuste qui restera tel quel tout au long de sa vie ? Avec un peu de provocation, on peut parler ici d'obsolescence programmée positive, c'est-à-dire une obsolescence qui facilite l'amélioration de l'éco-efficacité du produit tout en prévoyant une fin de vie optimisée pour les composants et/ou modules voués à ladite obsolescence. Cette stratégie peut donc être utilisée pour prolonger la durée de vie de la majeure partie du produit alors que des changements périodiques de

composants critiques lui permettent de rester à jour des exigences techniques et/ou commerciales ; on parle alors de cycles d'upgrade multiples (Pialot et al., 2012).

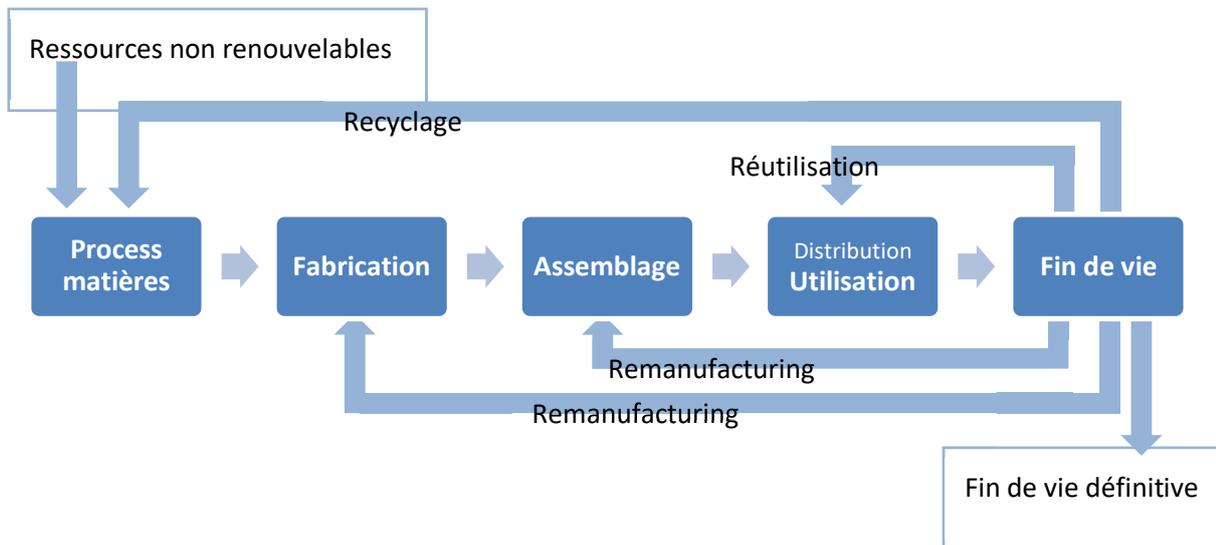


Fig. 13. Positionnement des méthodes du Df3R

Ce dernier concept est très lié aux différents principes qui concernent la fin de vie, abrégés en Df3R : *Design for Recycling, Remanufacturing and Reuse*. Pour plus d'efficacité et de pérennité, le concept d'*upgrade* doit être accolé au principe de *remanufacturing*. De cette manière, mieux que de simplement remettre à neuf un produit, des améliorations lui sont apportées pour le maintenir à niveau des attentes des clients. Ces méthodes permettent, pour les entreprises qui les appliquent, de conserver une part de la valeur des produits même après sa « fin de vie » classique. Les principes généraux communs aux différentes branches du Df3R sont les suivants :

- maximiser la modularité des produits ;
- favoriser les liaisons démontables, a minima entre les modules ;
- n'utiliser, autant que faire se peut, qu'un seul matériau par module ;
- maximiser l'utilisation des pièces standards ;
- optimiser l'ergonomie de l'opération de montage/démontage des modules entre eux.

Il faut noter que ces réflexions sont amenées à se développer au fur et à mesure que le principe de responsabilité étendue des producteurs progresse dans les textes contraignants auxquels sont soumises les entreprises, comme c'est déjà le cas avec la directive européenne sur les Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE) de 2003.

Ces nouvelles manières de penser les *business models* et la vie des produits posent aussi des questions logistiques importantes. L'optimisation des flux pour la multitude des modules composant une gamme de produits à cycles d'upgrade multiple ne peut se résoudre de manière intuitive. Dans ce domaine

également, la communauté scientifique fournit les travaux nécessaires à l'optimisation des performances environnementales et économiques permettant de rendre de tels modes de fonctionnement viables (Gwiazda et al., 2015).

Une étape du cycle de vie parfois très délicate à traiter est la phase d'utilisation du produit. Dans le cadre de *business model* de type *Business to Customer*, l'entreprise n'a pas de prise sur la manière dont l'utilisateur va se servir de son produit. De nombreuses incertitudes apparaissent alors quant à l'usage qui en sera fait et sur les performances de cet usage. Les études centrées sur la phase d'utilisation des produits se multipliant, il apparaît qu'il est souvent nécessaire de considérer non pas un unique mais plusieurs segments d'utilisateurs. Les personnes appartenant à ces différents segments utiliseront le produit de manières différentes, certaines pouvant engendrer davantage d'impacts environnementaux. Dans l'optique de minimiser ces impacts, il apparaît alors nécessaire d'élaborer des stratégies visant à guider la diversité des utilisateurs vers l'adoption d'un comportement soutenable optimisé (on utilise souvent le terme « éco-usage » pour désigner ces comportements).

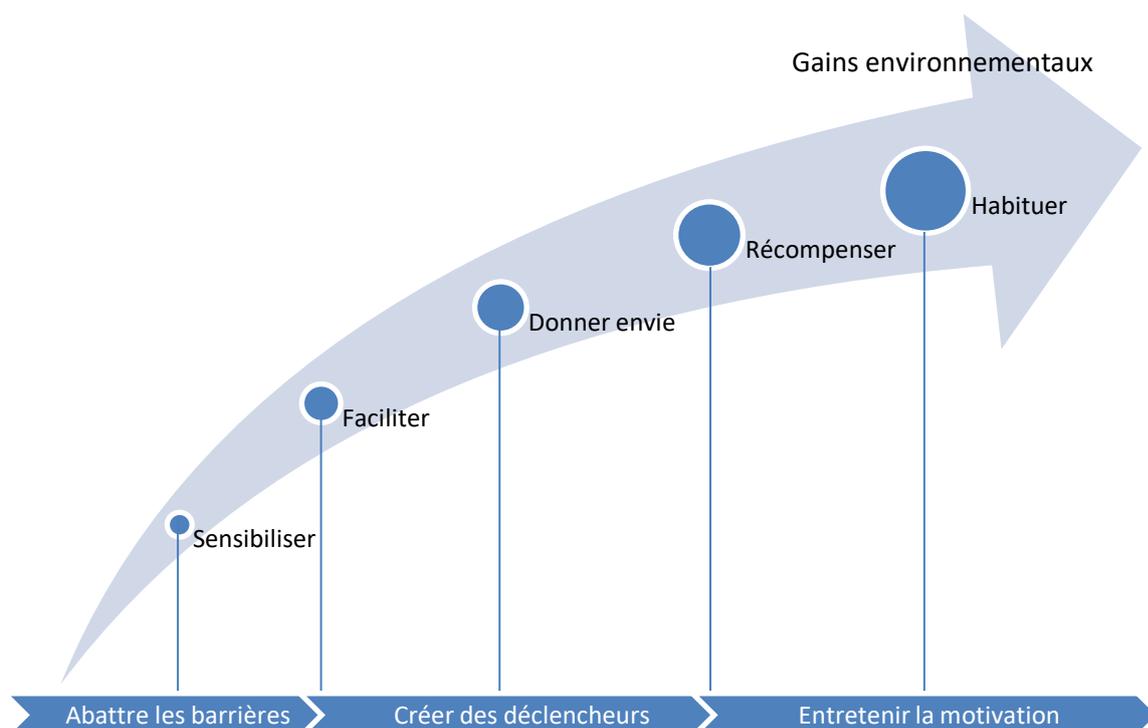
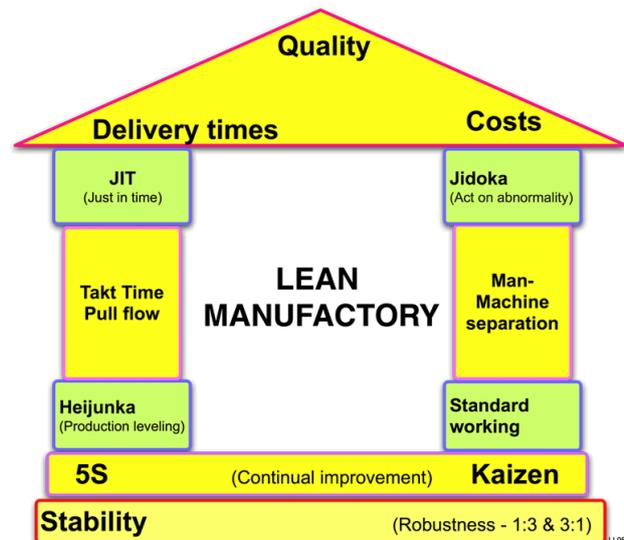


Fig. 14. Les cinq leviers du changement vers un comportement soutenable (Unilever, 2011)

La transition vers un comportement écoresponsable est un processus auquel s'intéressent à la fois chercheurs académiques et industriels. La figure 14 représente les cinq leviers du changement prônés par les éléments de communication du groupe Unilever. Ces leviers sont inspirés par les travaux de nombreux chercheurs tels que Wever, Lilley ou encore Bhamra qui se sont focalisés sur les stratégies à mettre en œuvre pour mener à bien la transition. Ces stratégies se révèlent complexes à mettre en œuvre à cause de plusieurs facteurs :

- une même stratégie n'aura pas les mêmes résultats pour l'ensemble des utilisateurs ;
- le choix et l'équilibrage entre stratégie informative, incitative ou contraignante doit être réfléchi pour amener les utilisateurs à comprendre et accepter le changement et, idéalement, à en devenir acteur volontaire ;
- le bilan environnemental des stratégies déployées doit être calculé afin de s'assurer que les coûts (module de feedback, modifications techniques, etc.) ne soient pas supérieurs aux gains obtenus par l'adoption d'un comportement soutenable d'une partie des utilisateurs.

Fig. 15. Modèle du système *Lean Production*

En ce qui concerne l'extraction des ressources, point de départ du cycle de vie des produits, l'écoconception soulève des questions pouvant être focalisées sur des problématiques sociales et éthiques, dépassant les domaines de l'ingénierie. Les questions de l'origine des matières premières ou des composants sous-traités, les conditions de travail des personnes qui y sont employés, les pressions sur les ressources locales comme l'eau ou la biodiversité doivent être posées mais sont réglées par la volonté des entreprises et des gouvernements à adopter des comportements éthiques (et donc à choisir des fournisseurs qui partagent les mêmes valeurs) plus que par la pure conception.

La phase de fabrication est probablement celle qui fut la première à être l'objet d'optimisations environnementales. Bien que la minimisation des consommations de matières et d'énergies aient été, en premier lieu, motivées par la volonté des industriels de diminuer leurs coûts de production pour augmenter leur marge bénéficiaire, ces principes et techniques ont facilement pu être appliqués aux problématiques environnementales. Cette réflexion de minimisation des pertes, que l'on peut dire basée sur le « bon sens » et la logique, est à l'origine de systèmes et méthodes célèbres tels que le *Toyota Production System* qui sera formalisé par la méthode du *Lean Manufacturing* (figure 15). De par la complexité de certains produits, les concepteurs doivent réaliser des compromis sur des mesures contradictoires (on demande par exemple de diminuer le poids des voitures pour réduire la consommation de carburant mais, en même temps, on demande des équipements de sécurité et de confort qui peuvent être très lourds). La combinatoire d'alternatives et de variables de conception devient trop grande pour arriver à des résultats optimisés en se basant simplement sur le bon sens et l'expérience des concepteurs. Des outils performants sont alors nécessaires.

Panorama des outils de l'écoconception

L'écoconception consiste en l'intégration des problématiques liées au développement durable au sein des problématiques classiques des projets de conception, et ce dès les premières étapes du processus. La norme ISO 14062 (2002) décrit une approche systémique pour guider cette intégration mais ne propose pas d'outils spécifiques permettant d'atteindre les objectifs posés en matière de performance environnementale, économique et sociale. De nombreux outils ont pourtant été développés par la communauté scientifique afin d'assister les concepteurs et ingénieurs dans leurs différentes missions. Bovea et Pérez-Belis fournissent dans leur étude de 2012 une classification des outils d'écoconception combinant méthodes d'évaluation environnementale et méthodes permettant de les intégrer aux problèmes de conception classiques (Figure 16). A l'intérieur de leur classification, il est intéressant de constater que dans la catégorie centrale des « outils pour l'intégration des aspects environnementaux au sein du processus de conception », 7 des 20 outils identifiés sont directement issus ou inspirés de la méthode *Quality Function Deployment* (QFD), soit 35%. Cette méthode est également présente dans la catégorie des « outils pour l'intégration des aspects environnementaux et des autres exigences traditionnelles au sein du processus de conception ». Du côté des « méthodes pour l'évaluation des aspects environnementaux », les outils directement issus ou inspirés des méthodes d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) sont les plus nombreux parmi les techniques semi-quantitatives et quantitatives. Dans cette dernière sous-catégorie, ces outils représentent 67% de l'ensemble des outils identifiés. Pour ces deux familles de méthodes, ces chiffres peuvent être interprétés comme la marque d'un consensus de la communauté scientifique quant à leur pertinence et à leur efficacité dans le cadre de la résolution de problèmes d'écoconception.

Alors que la précédente étude est principalement orientée vers les outils d'aide à la conception centrés sur les premières phases du cycle de vie, l'état de l'art bibliographique proposé par Ilgin et Gupta (2010) est lui largement focalisé sur les outils et méthodes destinés à l'optimisation de la fin de vie des produits. Ils proposent en conclusion des orientations pour les travaux futurs afin de combler les lacunes identifiées et de consolider les connaissances présentes dans la littérature.

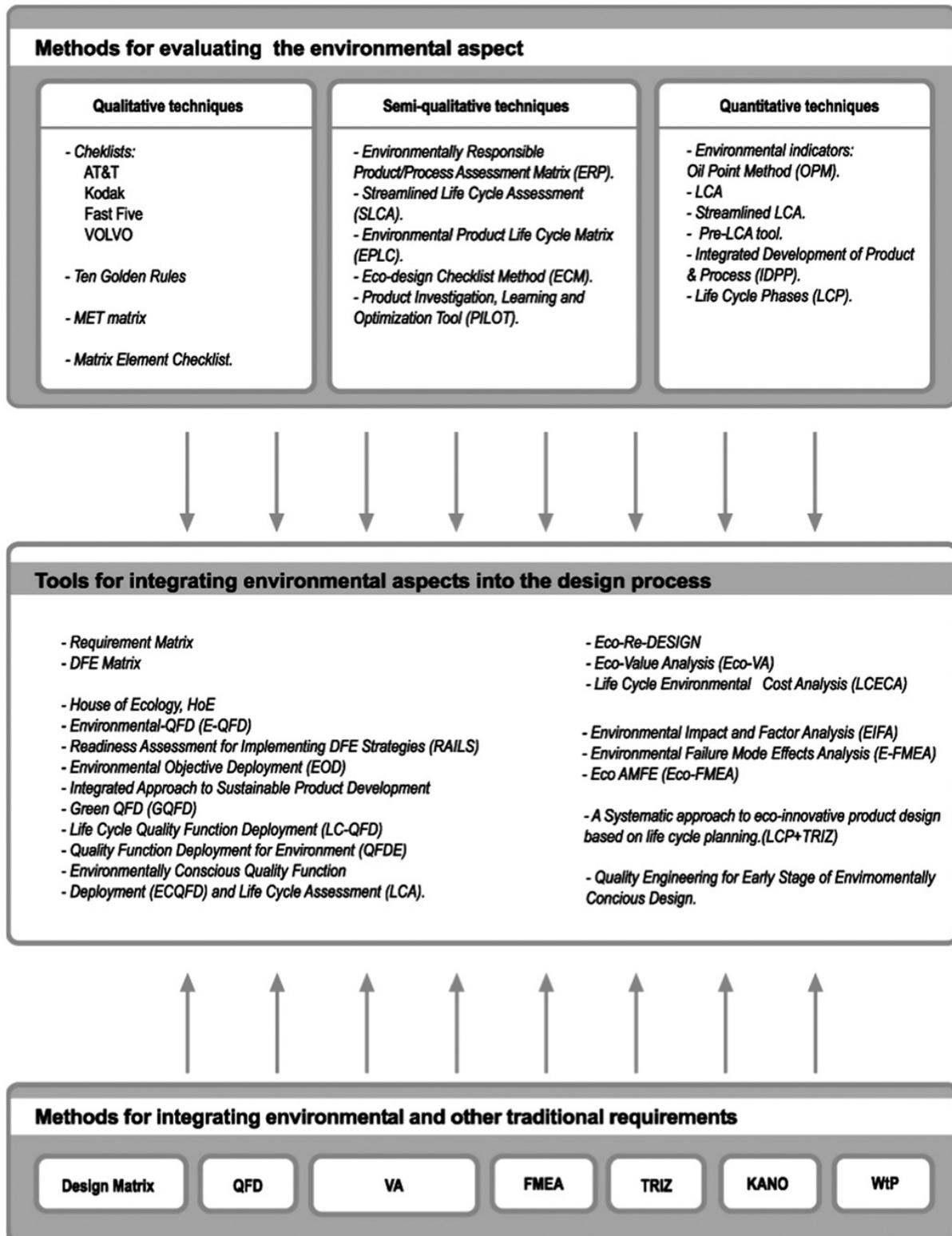


Fig. 16. Classification des outils d'écoconception, d'après Bovea et Pérez-Belis (2012)

Focus sur l'Analyse du Cycle de Vie

L'analyse du cycle de vie consiste en l'évaluation des impacts environnementaux liés au cycle de vie d'un produit, d'un procédé, d'un service ou d'une organisation. Elle est standardisée dans la famille de

normes ISO 1404X (figure 17). Les premiers travaux sur le sujet de l'évaluation des performances environnementales voient le jour dans les années 1970 en Grande Bretagne (Boustead, 1996) et aux États-Unis (Hunt et Franklin, 1996). Peu considérés dans un premier temps, c'est sous l'impulsion du Sommet de la Terre de Rio de 1992, alors qu'une conscience globale de la criticité des problèmes d'ordre environnemental est en train de naître, que l'Analyse du Cycle de Vie est démocratisée et prend une place prépondérante au sein de la communauté scientifique, tant du côté académique que du côté industriel (Klöpffer, 2014). Selon la norme ISO, l'ACV se déroule en quatre étapes :

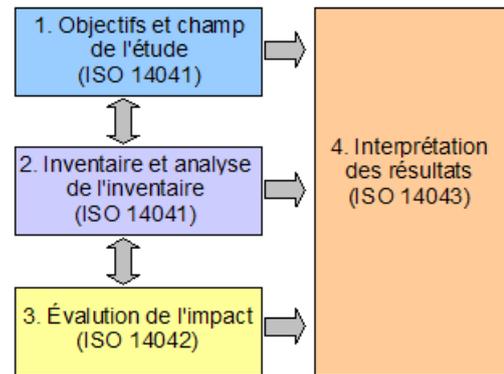


Fig. 17. Les 4 étapes de l'ACV

- *La définition des objectifs et du champ d'étude*

La première étape est la définition de l'objectif et des limites de l'étude : qu'est-ce qu'on évalue ? Cela porte sur le système étudié mais également sur la nature des résultats : sur les catégories d'impacts choisies et les méthodes de validation de l'étude. Une fois ces aspects clarifiés, une unité fonctionnelle peut être définie. Cette unité représente une quantification de la fonction d'un produit. Elle permet notamment de comparer des produits différents mais qui ont la même unité fonctionnelle.

- *L'analyse de l'inventaire du cycle de vie*

Cette étape consiste à inventorier l'ensemble des flux en lien avec le système étudié. Cela comprend toutes les ressources entrantes et tous les produits et déchets sortants du système. Ces flux sont paramétrés pour correspondre à l'unité fonctionnelle donnée.

- *L'évaluation des impacts du cycle de vie*

Une fois l'ensemble des flux identifié, les scores d'impacts environnementaux qui y sont associés sont calculés : un score pour chaque catégorie d'impact considérée. La figure 18 montre comment, à partir des flux de référence qui caractérisent chaque élément du système étudié (consommations de ressources, émissions de CO₂, NO_x, etc.), des scores d'impacts environnementaux peuvent être calculés puis regroupés dans des indicateurs plus ou moins globaux, jusqu'au score unique.

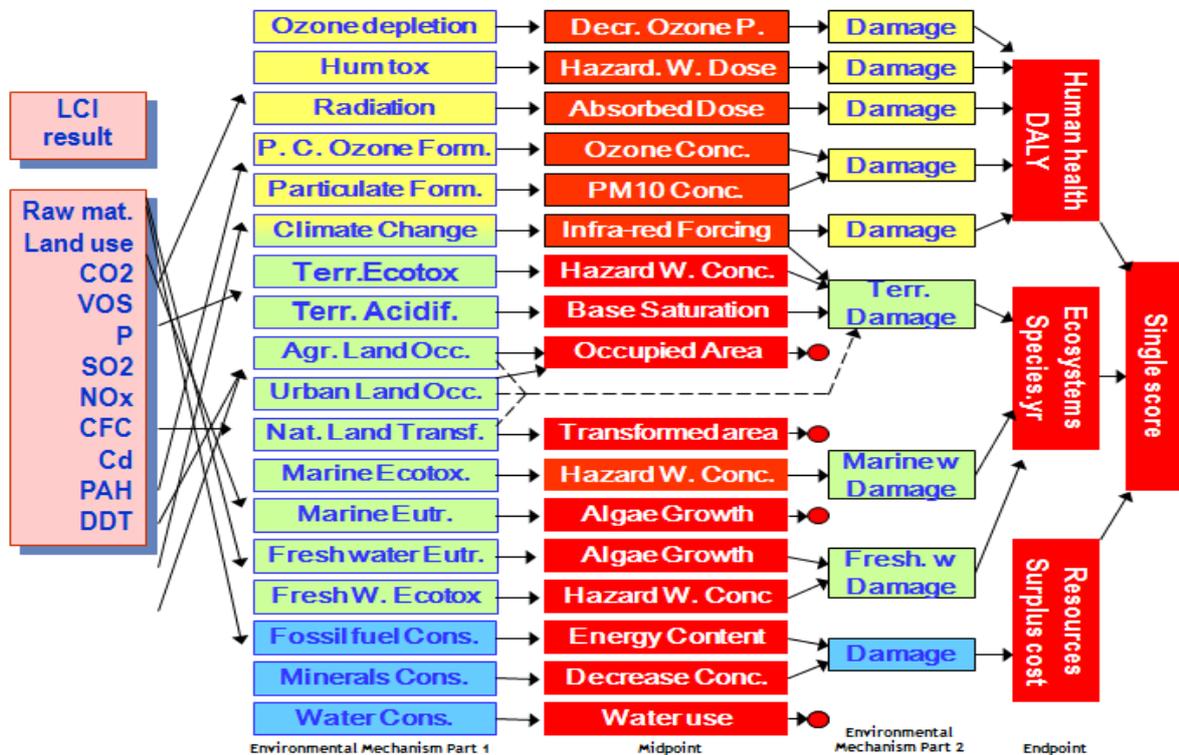


Fig. 18. Les différents niveaux d'agrégation de la méthode ReCiPe

- *L'interprétation de l'Analyse du Cycle de Vie*

L'interprétation de l'ACV consiste à fournir les conclusions de l'étude en prenant en compte les incertitudes liées aux hypothèses réalisées. Ces hypothèses concernent notamment la définition du champ et des limites de l'étude qui, pour être traitée, doit souvent laisser de côté certains flux. Elles concernent aussi la qualité des données tirées de bases de données qui ne sont pas nécessairement suffisamment précises étant donné l'extrême diversité des problèmes d'écoconception. A ce stade, l'analyse de sensibilité est souvent utilisée pour évaluer la robustesse des résultats de l'étude.

Focus sur le Quality Function Deployment

Pour un produit donné, le QFD est une méthode d'aide à la conception qui permet de traduire les besoins exprimés par les clients en caractéristiques techniques, en caractéristiques des composants, en opérations de production, puis finalement en opérations de contrôle qualité. On doit cette méthode à Yuji Akao qui l'a développée en 1966. De nombreux chercheurs ont depuis travaillé à son évolution.

L'outil emblématique du QFD est la « maison de la qualité » où, dans la première phase de la méthode, les besoins client sont utilisés pour hiérarchiser les caractéristiques techniques qui permettront de les satisfaire. Cette maison est divisée en 6 matrices (la liste suivante utilise la numérotation de la figure 19) :

1. Les exigences client sont une liste de besoins exprimés par les clients, le plus souvent récoltés par le biais d'études sur le terrain. Le terme de client est à prendre au sens le plus large et peut inclure d'autres acteurs tels que l'Environnement (Green-QFD).
2. La matrice de planning sert à hiérarchiser les exigences clients. Traditionnellement, cela est fait selon leur importance pour les clients eux-même, selon la concurrence et selon la stratégie d'entreprise. Chaque exigence est notée sur ces trois critères et un score global est établi. C'est sur ce dernier score que se fait la hiérarchisation des besoins.
3. Pour chaque exigence client la question suivante est posée : quels sont les aspects techniques du produit qui permettent de répondre à ce besoin ? Ces aspects techniques sont listés dans cette matrice.
4. Les interrelations servent à quantifier à quel point un aspect technique est important pour répondre à une exigence client donnée. Sa note sera élevée s'il est indispensable à la satisfaction de l'exigence, sa note sera nulle s'il n'y participe pas du tout.
5. Le « toit » fait apparaître les corrélations entre les différents aspects techniques du produit. Il permet notamment d'indiquer si l'augmentation d'une performance entraîne la diminution ou l'augmentation d'une autre et vice-versa.
6. Dans la matrice objectifs sont calculés les score de chaque aspect technique au vu de leurs importances à la satisfaction d'un ensemble d'exigences et à la hiérarchisation de ces mêmes exigences. Ces scores peuvent être comparés aux mêmes scores calculés pour plusieurs produits concurrents et ainsi servir à des fins stratégiques. Ils peuvent permettre d'établir des valeurs objectif pour chaque aspect technique, d'où le nom de cette matrice.

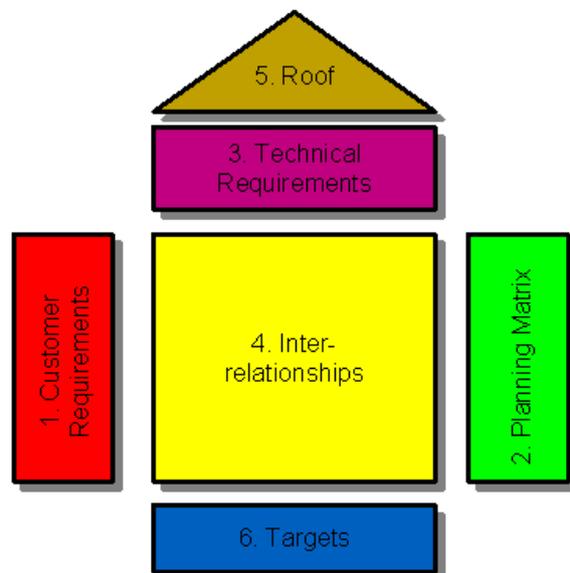


Fig. 19 : La Maison de la Qualité du QFD

L'outil utilisé pour la deuxième phase du QFD, où les caractéristiques techniques prennent la place des exigences client pour être mis en relation avec les caractéristiques des composants, est semblable à la Maison de la Qualité. Nous ne parlerons pas ici des deux phases suivantes qui concernent les opérations de production et de contrôle qui ne rentrent pas dans le champ d'étude de la thèse.

Deux qualités principales des méthodes QFD sont leur grande flexibilité et leur caractère transversal :

- elles permettent d'intégrer une multitude d'exigence pour une multitude d'acteurs, ces exigences pouvant être qualitatives ou quantitatives ;
- elles permettent de cristalliser un large spectre de connaissances autour du produit, l'élaboration de la maison de la qualité faisant appel aux clients, aux commerciaux, aux ingénieurs, aux décideurs, aux fournisseurs, aux autorités supérieures, etc. ; c'est donc un outil qui favorise la synthèse et la bonne organisation d'un projet de conception.

Focus sur les outils d'optimisation

Un problème d'optimisation de conception peut être formulé de la manière suivante :

- **Un ensemble de variables** de conception représente les spécifications sur les valeurs desquelles il est possible d'agir. Elles peuvent être continues, c'est le cas des dimensions (épaisseur d'une coque, longueur d'un axe, etc.), ou discrètes, dans le cas de choix technologiques par exemple (longueurs standard, modèles de moteurs, etc.).
- **Les domaines des variables** donnent l'étendue des valeurs possibles pour chaque variable ([longueur min. ; longueur Max.], {choix 1 ; choix 2 ; choix 3}, etc.).
- **Les contraintes** représentent les relation entre les variables. Ce sont des conditions qui doivent être satisfaites pour que la conception soit valide (masse < x kg ; longueur 1 > longueur 2 ; etc.).
- **L'objectif** de résolution est une fonction des variables de conception qui doit être maximisée ou minimisée (*minimiser* ($\sum masses$) ; *maximiser* ($x \sum perf. enviro. + y \sum perf. éco.$) ; etc.).
- **Le modèle** est l'endroit qui regroupe et crée le lien entre variables, domaines, contraintes et objectif.

De par la grande quantité de calculs nécessaire à la résolution des problèmes, les outils d'optimisation en tant que tels ont connu leur essor à partir des années 90 avec la démocratisation des ordinateurs personnels et de bureau. On peut cependant en voir les prémices dès les années 60 où le concept de *structural design optimization* apparait, puis dans les années 80 avec le multidisciplinary design optimization (MDO), terme encore utilisé aujourd'hui pour parler d'optimisation en conception.

A leurs débuts, les méthodes d'optimisation étaient basées sur des algorithmes à base de gradient qui ont le défaut de facilement rester « coincés » dans un optimum local de l'espace des solutions. Les algorithmes génétiques et autres méthodes stochastiques plus récents ont été développés dans le but de pallier ce problème mais nécessitent des temps de calcul souvent importants.

Problématique et méthodologie de recherche

Nous avons vu dans le panorama des outils de l'écoconception qu'une multitude d'outils existent pour l'évaluation des impacts environnementaux et/ou l'intégration des aspects environnementaux au sein des problèmes de conception. En revanche, aucun outil faisant appel à des algorithmes d'optimisation n'est listé dans la classification de ces outils. S'il est important, dans un premier temps, de disposer de méthodes permettant d'intégrer les aspects environnementaux ainsi que les complexités liées à la phase d'utilisation et à la fin de vie, il est crucial, dans un second temps, que la conception d'un produit puisse être optimisée en prenant en compte tous ces aspects simultanément. Un tel système montre une grande complexité de par le nombre des alternatives de conception, la diversité de ses utilisateurs et de ses usages et le choix des différents scénarios de fin de vie possibles. L'écoconception d'un produit, bien qu'en premier lieu centrée sur les aspects environnementaux, ne doit pas pour autant négliger les attentes des utilisateurs en matière de fonctionnalité. Un produit écoconçu ne peut avoir un impact environnemental global positif que s'il rencontre un succès suffisant sur son marché. Pour cette raison, les aspects d'attractivité du produit auprès de ses clients potentiels doivent être pris en compte dans toute stratégie d'écoconception.

Les problématiques variées que nous venons de citer présentent de plus des interrelations qui rendent impossible une résolution intuitive d'un problème d'écoconception complexe. Des outils performants sont donc nécessaires. Trois questions de recherche ont été formulées suite à ces constats.

Comment obtenir une modélisation réaliste des usages d'un produit et comment contrer les usages ayant des conséquences négatives ?

La phase d'utilisation des produits peut dans certains cas concentrer la majorité des impacts environnementaux de leur cycle de vie. Or, en raison de la complexité souvent élevée de cette phase, notamment dans le cas des schémas *business to customer* classiques, les outils pour la prise en compte des aspects de la phase d'utilisation requièrent de faire des hypothèses et des simplifications fortes (un unique utilisateur moyen, un unique schéma d'utilisation standard), lissant ainsi la diversité des segments d'utilisateurs de même que la diversité des usages ; diversités qui doivent être prises en compte si l'on souhaite réaliser une optimisation efficace des comportements des utilisateurs. Notre but est ici d'obtenir une modélisation de ces diversités afin de pouvoir les inclure, de même que les solutions permettant de les influencer positivement, à la méthodologie d'optimisation qui fait l'objet de la deuxième question de recherche. Nous avons donc formulé la première question de recherche de la manière suivante :

Première question de recherche

Comment élaborer une modélisation réaliste des usages d'un produit, mettant en avant le caractère plus ou moins soutenable des différents segments d'utilisateurs, et quelles solutions pour influencer positivement ces usages ?

Comment optimiser la conception du cycle de vie et l'attractivité d'un produit avec une approche multicritère ?

Nous avons souligné dans la partie précédente le manque de liens entre outils d'optimisation et outils d'intégration des performances environnementales en phase de conception. Ces deux familles d'outils sont pourtant bien établies et plusieurs auteurs ont d'ores et déjà exploré les associations possibles entre elles. On constate cependant qu'aucune méthode d'optimisation pour l'écoconception ne se démarque par ses qualités généralistes et transversales. La plupart des méthodes développées dans la littérature restent le plus souvent spécifiques à certains types de produits, process, *business model*, etc. De plus, les aspects d'attractivité produit-client n'y sont pas traités. Nous avons donc défini la deuxième question de recherche de la manière suivante :

Deuxième question de recherche

Comment, et avec quels outils, élaborer une méthodologie transversale pour l'optimisation environnementale et multicritère du cycle de vie des produits prenant en compte les aspects d'attractivité envers les utilisateurs ?

Comment obtenir une sélection d'alternatives de conception pertinente au cours d'une démarche d'optimisation où les variables de conception ne sont pas figées ?

La modélisation d'un système peut relever de l'impossible si le but est d'obtenir un modèle ultra réaliste de l'ensemble des aspects relatifs au système et à ses alternatives de conception. Il est donc nécessaire de définir en amont le panel des alternatives de conception qui « méritent » d'être sélectionnées pour être ensuite modélisées finement. Pour parvenir à cette sélection alors que les variables de conception du produit ne sont pas encore figées, il est nécessaire de créer une modélisation préliminaire, qui ne présente pas nécessairement une très grande précision mais permet de comparer l'ensemble des alternatives en prenant en compte leurs liens avec le reste des variables du système. Nous avons donc formulé la troisième question de recherche de la manière suivante :

Troisième question de recherche

Comment, en phase amont de conception, déterminer le panel d'alternatives de conception pertinent à modéliser dans le cadre de la démarche d'éco-optimisation ?

Synthèse

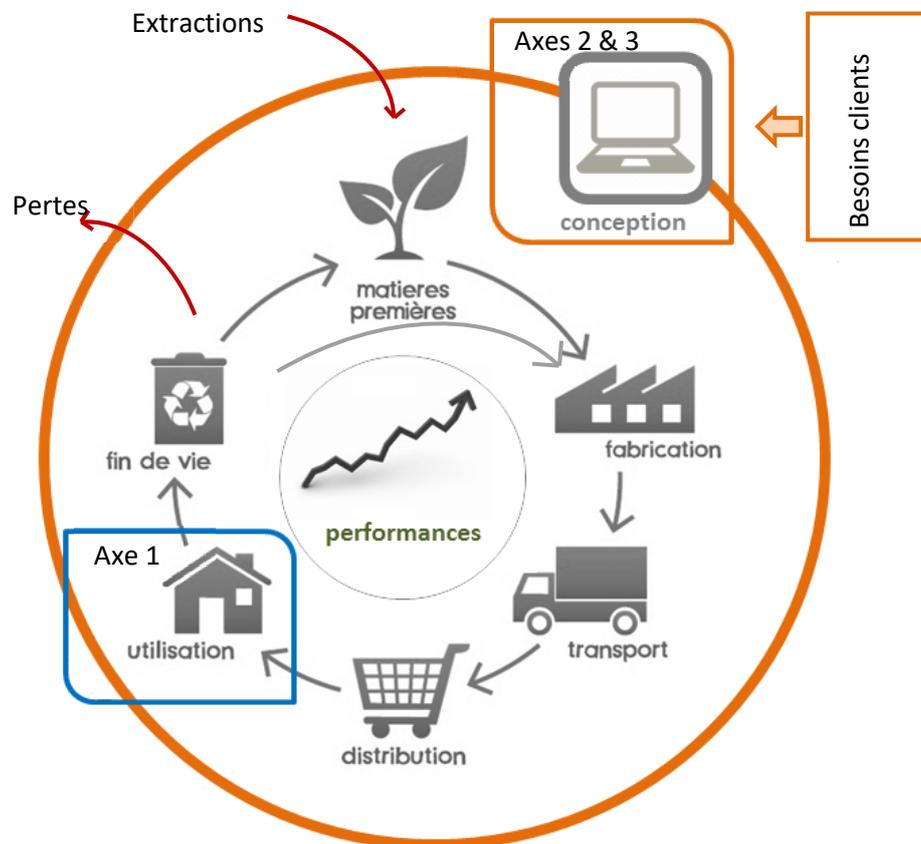


Fig. 20. Les trois questions de recherche du travail de thèse

Les trois questions de recherche exprimées dans cette partie sont représentées dans la figure 20 qui explicite leur ordonnancement. La deuxième question, centrée sur la phase d'utilisation, s'insère dans le champ d'étude de la première question qui traite de la méthodologie globale. Elle pose les bases de la modélisation du cycle de vie des produits sur lesquelles s'appuiera la question 3, centrée sur les choix pertinents quant aux alternatives de conception. Ces trois questions concernent des aspects profondément interconnectés. Le résultat doit donc être une méthodologie logique et cohérente pour l'optimisation transversale de l'écoconception du cycle de vie des produits.

Références

- Andrae, A.S.G., Edler, T., 2015. On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. *Challenges* 6, 117–157. doi:10.3390/challe6010117
- Bihouix, P., 2014. *L'âge des low tech: vers une civilisation techniquement soutenable*. Seuil.
- Bihouix, P., De Guillebon, B., 2013. *Quel futur pour les métaux?: raréfaction des métaux: un nouveau défi pour la société*. EDP sciences.
- Boustead, I., 1996. LCA—How it came about. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 1, 147–150.
- Bovea, M.D., Pérez-Belis, V., 2012. A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product design process. *Journal of Cleaner Production* 20, 61–71. doi:10.1016/j.jclepro.2011.07.012

- Brezet, H., Van Hemel, C., Böttcher, H., Clarke, R., Industry, U.N.E.P., (Paris), E., Hague), R.I.(# T., (Delft), D.U. of T., 1997. Ecodesign: a promising approach to sustainable production and consumption. UNEP.
- Brundtland, G.H., 1987. Our common future—Call for action. *Environmental Conservation* 14, 291–294.
- Chapman, J., 2015. *Emotionally durable design: objects, experiences and empathy*. Routledge.
- Charter, M., Chick, A., 1997. Welcome to the first issue of the journal of sustainable product design. *Journal of Sustainable Product Design* 1, 5–6.
- Cohen, Y.H., Reich, Y., 2016. The Structural Biomimetic Design Method Manual: Process (Flow Charts), Tools, Templates and Guidelines, in: *Biomimetic Design Method for Innovation and Sustainability*. Springer, pp. 121–134.
- Cooper, T., 2016. *Longer lasting products: alternatives to the throwaway society*. CRC Press.
- Dandara, C., Endrenyi, L., Kolker, E., Hekim, N., Steuten, L.M., Güngör, K., Aklillu, E., Özdemir, V., 2016. *Precision Medicine 2.0: The Rise of Glocal Innovation, Superconnectors, and Design Thinking*. Mary Ann Liebert, Inc. 140 Huguenot Street, 3rd Floor New Rochelle, NY 10801 USA.
- Gwiazda, A., Monica, Z., Czekanski, A., 2015. Application of the Advanced Engineering Systems for Modeling Logistics Processes, in: *Forum Scientiae Oeconomia*. pp. 81–93.
- Hunt, Robert G., Franklin, W.E., Hunt, R. G., 1996. LCA—How it came about. *The international journal of life cycle assessment* 1, 4–7.
- Ilgin, M.A., Gupta, S.M., 2010. Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art. *Journal of Environmental Management* 91, 563–591. doi:10.1016/j.jenvman.2009.09.037
- Jancovici, J.-M., 2015. *Dormez tranquilles jusqu'en 2100*. Odile Jacob, Paris.
- Joore, P., Brezet, H., 2015. A Multilevel Design Model: the mutual relationship between product-service system development and societal change processes. *Journal of Cleaner Production* 97, 92–105.
- Klöppfer, W., 1997. Life cycle assessment. *Environmental Science and Pollution Research* 4, 223–228.
- Krystofik, M., Wagner, J., Gaustad, G., 2015. Leveraging intellectual property rights to encourage green product design and remanufacturing for sustainable waste management. *Resources, Conservation and Recycling* 97, 44–54.
- Lenn, D.J., 2015. Principles of Responsible Management: Glocal Sustainability, Responsibility, and Ethics. *Academy of Management Learning & Education* 14, 299–301.
- Pialot, O., Millet, D., Tchertchian, N., 2012. How to explore scenarios of multiple upgrade cycles for sustainable product innovation: the “Upgrade Cycle Explorer” tool. *Journal of Cleaner Production* 22, 19–31. doi:10.1016/j.jclepro.2011.10.001
- Piscicelli, L., Cooper, T., Fisher, T., 2015. The role of values in collaborative consumption: insights from a product-service system for lending and borrowing in the UK. *Journal of Cleaner Production* 97, 21–29.
- Reuter, M., Hudson, C., Van Schaik, A., Heiskanen, K., Meskers, C., Hagelüken, C., 2013. *Metal recycling: Opportunities, limits, infrastructure. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel*, UNEP.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., Vries, W. de, Wit, C.A. de, Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M., Ramanathan, V., Reyers, B., Sörlin, S., 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347, 1259855. doi:10.1126/science.1259855
- Strasser, C., Wimmer, W., 2003. Supporting customer driven Eco-Solutions-Implementing Ecodesign in the daily work of product developers, in: *Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 2003. EcoDesign'03. 2003 3rd International Symposium on. IEEE*, pp. 757–762.
- Tainter, J., 1990. *The collapse of complex societies*. Cambridge University Press.
- Unilever, 2016. *Unilever sustainable living plan - Inspiring sustainable living: Unilever's five levers for change*.

- van Nes, N., Cramer, J., 2006. Product lifetime optimization: a challenging strategy towards more sustainable consumption patterns. *Journal of Cleaner Production*, EcoDesign: What's happening? 14, 1307–1318. doi:10.1016/j.jclepro.2005.04.006
- Vidal, 2014. The need of mineral resources for a low carbone society. *ujf Grenoble*.
- Wang, R., Higgins, D.C., Lee, D.U., Prabhudev, S., Hassan, F.M., Chabot, V., Lui, G., Jiang, G., Choi, J.-Y., Rasenthiram, L., others, 2016. Biomimetic design of monolithic fuel cell electrodes with hierarchical structures. *Nano Energy* 20, 57–67.
- Wimmer, W., Züst, R., 2003. *ECODESIGN Pilot: Product-Investigation-, Learning-and Optimization-Tool for Sustainable Product Development with CD-ROM*. Springer Science & Business Media.
- Yang, S.S., Ong, S.K., Nee, A.Y.C., 2015. Product Design for Remanufacturing, in: *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*. Springer, pp. 3195–3217.

Chapitre 3. Proposition d'une méthodologie générale

A la lumière des questions de recherche exprimées dans le chapitre précédent, un panorama des différents champs de littérature scientifique concernés est proposé dans la section suivante. Nous proposons ensuite une méthodologie générale permettant de répondre aux trois questions de recherche précédemment exprimées.

Les différents aspects de la méthodologie ne sont pas traités en détail dans cette partie introductive mais constituent les chapitres suivants, rapportés sous forme d'articles de recherche ou de compléments à ces articles.

Panorama de la littérature scientifique explorée

Au regard des questions de recherche exprimées, quatre champs de la littérature scientifique à explorer ont été définis. Ces champs sont introduits dans la figure 21 avant d'être détaillés dans les sections suivantes.

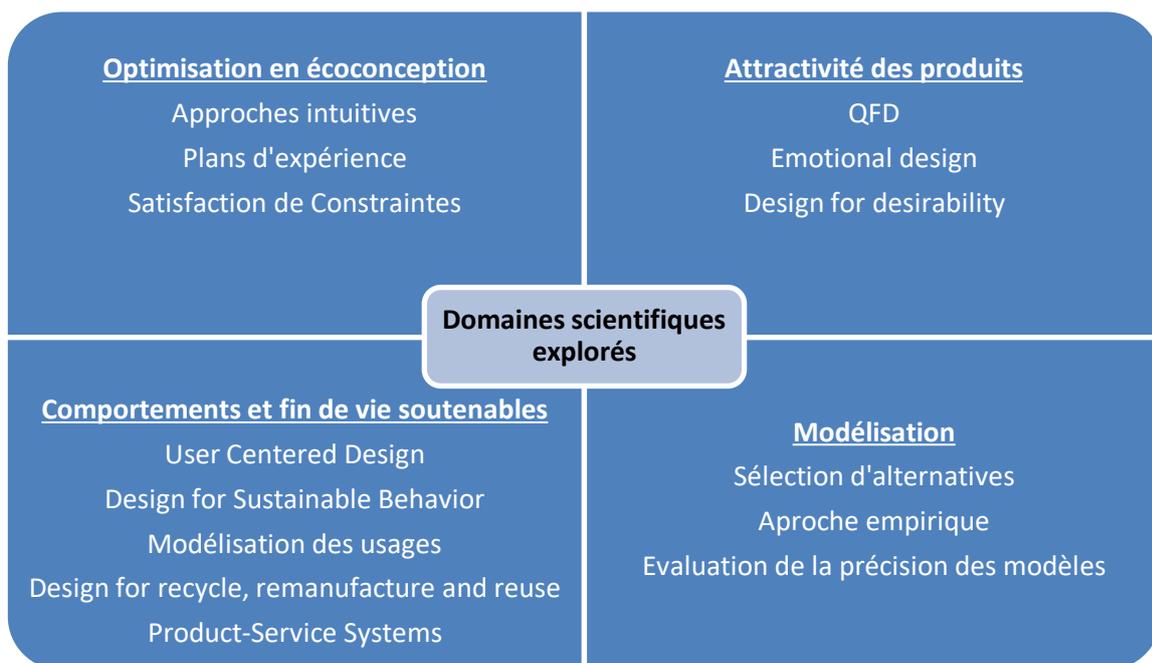


Fig. 21. Les 4 champs de la littérature scientifique explorée

Cette section n'a pas vocation à fournir un état de l'art exhaustif de la connaissance scientifique dans les domaines abordés. Son but est davantage de mettre en évidence l'évolution des sujets de recherche pour en arriver aux aspects qui nous intéressent dans ce travail de thèse.

Optimisation en écoconception

La méthodologie d'optimisation générale développée dans ce travail de thèse s'inscrit dans la lignée des méthodes et outils existants pour l'optimisation des performances fonctionnelles et économiques de produits. Ces concepts font l'objet de recherches et d'applications depuis de nombreuses années.

Bien que l'optimisation des coûts ait probablement existé depuis les premiers jours de l'artisanat, des concepts plus poussés tels que *Value Engineering* (Dell'Isola, 1966) ont été développés à partir des années 1940. Du côté environnemental, les méthodes d'ACV se révélant insuffisantes pour répondre aux impératifs d'amélioration des performances imposés aux concepteurs (Millet et al., 2007), des chercheurs comme Azapagic et Clift (1999, 1999a, 1999b) ont expérimenté des couplages entre méthodes d'optimisation et ACV afin d'obtenir des outils d'aide à l'écoconception plus performants. Pieragostini et al. (2012), recensent en 2012 quinze méthodologies couplant ACV et méthode d'optimisation. Cependant, sont absentes de leur recensement des méthodologies généralistes appliquées à la conception de produits. En 2013, Tchertchian et al. (2013) comparent sur un même problème trois approches différentes : une intuitive, une par plans d'expérience et une par satisfaction de contraintes. Ils montrent l'intérêt et les avantages d'une approche couplant ACV et satisfaction de contraintes pour l'écoconception de systèmes complexes. L'efficacité des approches CSP est également éprouvée quant à la modélisation de la phase d'utilisation de produits (Yannou et al., 2010) et quant à la gestion des décisions dans un contexte de conception collaborative (Yvars, 2009).

Nous voyons ici que l'évolution s'est faite à partir des outils d'analyses utilisés en écoconception auxquels ont été adossées des modélisations de plus en plus paramétrables du produit. L'accès de plus en plus aisé aux techniques d'optimisation donne la combinaison logique des tendances actuelles qui cherchent à coupler optimisation et évaluation environnementale sur des problèmes de plus en plus complexes.

Attractivité des produits

L'amélioration de l'attractivité d'un produit peut notamment se faire par une meilleure prise en compte des exigences client. Cela doit permettre de concevoir un produit répondant au mieux à leurs attentes et donc susceptible de rencontrer un large succès sur son marché. Parmi les techniques les plus employées pour ce faire se trouvent celles de la famille QFD (Akao, 2004). Au sein de cette famille, plusieurs auteurs ont adapté les techniques traditionnelles aux problématiques spécifiques de la prise en compte des aspects environnementaux. On peut citer le *GreenQFD* de Cristofari et al. (1996), perfectionné en *GreenQFD-II* par Zhang (1999) puis en *Green-QFD-III* par Mehta et Wang (2001), le *Environmental QFD* de Halog et al. (2001), le *QFD for Environment* de Masui et al. (2001), le *Eco-QFD* de Kuo et al. (2009), le QFD-DEA (Data Envelopment Analysis) de Ramanathan et Yunfeng (2009) pour l'intégration de données environnementales et économiques et le *Environmentally Conscious QFD* de Francis (2009).

Une autre branche de la communauté scientifique se penche plus avant sur les facteurs d'attractivité des produits. Pour quelles raisons un produit suscite-t-il plus l'acte d'achat qu'un autre ? On peut citer dans cette branche Zvacek (1991) qui pose les bases du *Effective Affective Design*, repris par de nombreux auteurs par la suite, Eckman et Wagner (1994) qui étudient l'influence d'attributs visuels du produit au regard de différents segments de consommateurs, Markeset et Kumar (2001) qui utilisent

l'Analyse de Risques pour améliorer l'attractivité des produits, Hekkert (2006) qui propose une étude sur le "plaisir" qui peut être déclenché chez le consommateur par différents mécanismes utilisables en phase de conception, Smith et al. (2007) avec une étude la mise en œuvre de l'attractivité dans un environnement urbain (bien que centrée sur une problématique d'urbanisme, l'étude soulève des aspects transversaux de l'attractivité envers les utilisateurs) et Goellner et al. (2010) qui réalisent un travail où collaborent chercheurs académiques et industriels, dans un cadre de recherche-action, pour la mise en pratique des techniques de *design for desirability*.

La branche du *Emotional Design* peut être vue comme un pas en avant supplémentaire dans la compréhension des mécanismes qui créent le lien entre produit et consommateur. On peut ici citer Norman (2005) qui propose les bases de ce concept dans un livre sous-titré "*Why we love (or hate) everyday things*", Khalid et Helander (2006) qui développent les problématiques de mesure des émotions créées par un aspect du produit, Desmet et al. (2007) qui se concentrent sur ce qu'ils appellent l'effet "wow!" et Huang et al. (2012) qui appliquent les techniques Kansei pour le *emotional design* (voir figure 22).

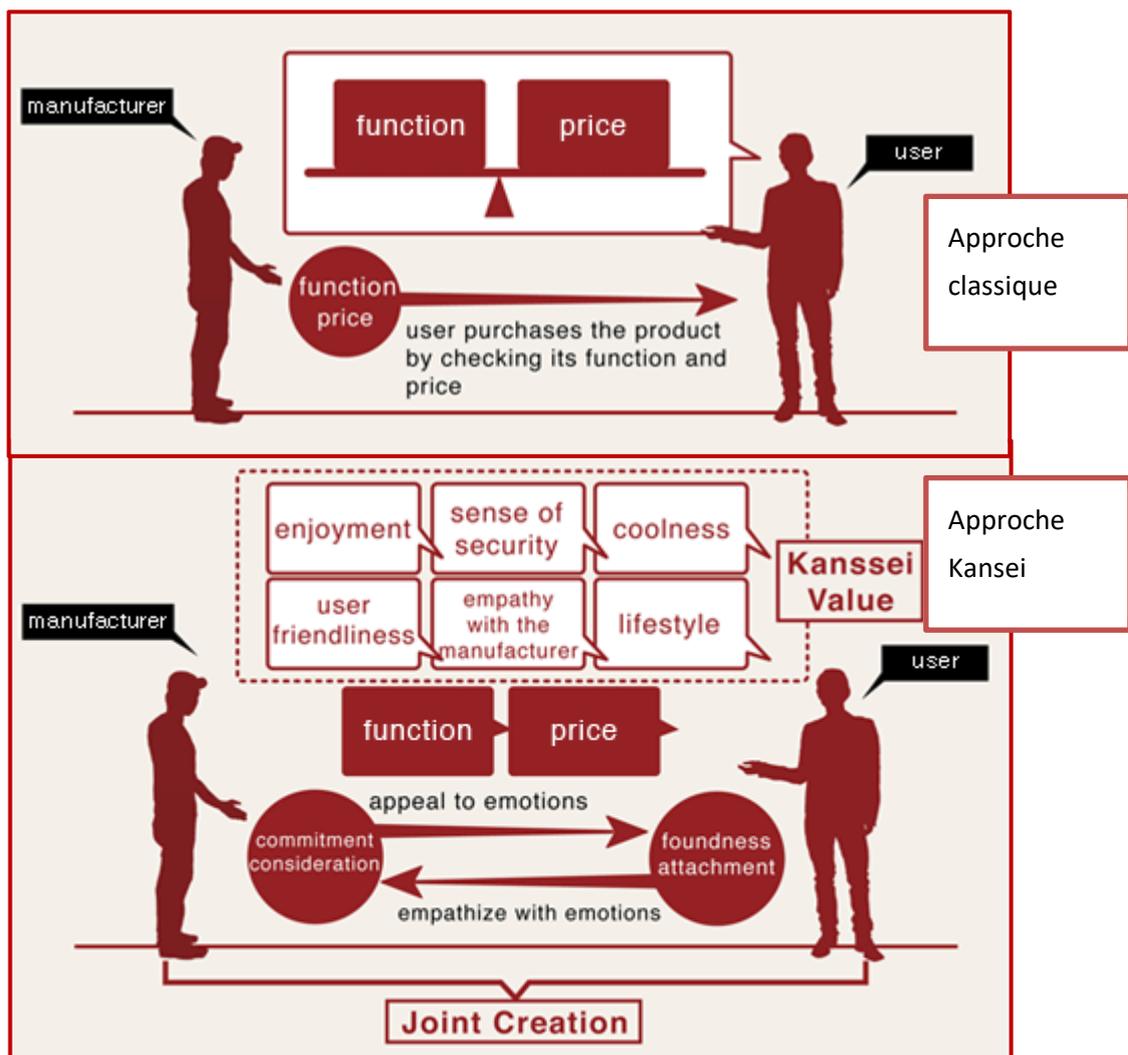


Fig. 22. Les principes du *Kansei Engineering* illustrent parfaitement l'intérêt du concept de *Design for Desirability* (Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan, 2010)

Nous voyons que la tendance est à la prise en compte de plus en plus fine des processus qui régissent les décisions des clients potentiels. La littérature offre désormais un panel de concepts et de techniques pour concevoir des produits adaptés et désirables vis-à-vis des clients. Cela est mis en évidence par les outils basés sur la méthode QFD qui s'enrichissent au fil des évolutions des méthodes de conception proposées par la communauté scientifique. Ces outils sont idéaux dans le cadre d'une intégration à des méthodologies plus globales.

Comportements et fin de vie soutenables

Comportements soutenables

L'intérêt pour les performances de la phase d'utilisation et l'optimisation du comportement des utilisateurs sont relativement tardifs au sein de la communauté scientifique. Les prémices de ces concepts se trouvent dans le domaine de l'informatique où, dès 1999, la norme ISO 13407 pose les bases des *Human-centered design processes for interactive systems*. La mise en œuvre de ces normes a notamment été étudiée par Jokela et al. (2003).

Côté produits, une première focalisation des concepteurs se fait sur la personnalisation des produits de manière à créer un lien avec le client et ainsi favoriser sa fidélité (Kramer et al., 2000). Bien qu'ayant des objectifs centrés sur les performances commerciales, la personnalisation peut aussi être utilisée avec des objectifs environnementaux, par exemple en favorisant une durée de vie d'autant plus longue que le consommateur est attaché au produit. En 2003, Frascara met en avant l'intérêt des approches participatives appliquées aux problèmes de conception centrés autour de l'utilisateur. Il propose ainsi d'inclure davantage le principal intéressé, l'utilisateur, dans la démarche de conception. Abras et al. réalisent en 2004 un panorama des méthodes affiliées au *User-Centered Design* pour conseiller les concepteurs quant au choix des méthodes les plus adaptées à leurs projets. En associant les concepts de *Situation Awareness* et de *User-Centered-Design*, Endsley (2016) propose de faire un pas en avant supplémentaire avec une prise en compte fine de l'influence de l'environnement extérieur sur la relation entre produit et utilisateur.

La branche issue du *User-Centered Design* focalisée sur la prise en compte des aspects environnementaux s'est développée autour du concept de *Design for Sustainable Behaviour* (DfSB). Parmi les premiers auteurs à étudier ce sujet se trouve Blevis (2007) avec le concept de *Sustainable Interaction Design*. C'est ensuite Lockton et al. (2008) qui ouvrent la voie du DfSB en proposant des techniques permettant de rendre l'utilisateur plus efficace. Ils s'appuient notamment sur des solutions technologique présentant des caractères contraignants notés de « nul » à « très fort » avec respectivement les *ecofeedbacks*, les *persuasive technologies* et les *forced functionalities*. Wever et al. (2008), puis Lilley (2009) développent davantage l'exploration des stratégies d'intervention pour un changement soutenable du comportement des utilisateurs et identifient les freins au changement pouvant être créés, volontairement ou non, par les utilisateurs. Plus récemment, Grevet et al. (2010) montrent l'intérêt des visualisations sociales (la comparaison des performances d'usage d'un

utilisateur par rapport aux performances d'une communauté, que cela soit par une mise en compétition ou en collaboration) pour l'amélioration des comportements en matière de consommations d'énergies dans le cadre résidentiel. Dans le même courant, McKenzie-Mohr (2013) continue de développer les aspects sociaux et communautaires pour la généralisation des comportements écoresponsables.

La modélisation des phases d'utilisation est un sujet complexe dans la mesure où l'utilisateur est seul maître de ses pratiques. La description des usages, nécessaire à leur modélisation, est donc un processus où doivent nécessairement être faites de nombreuses hypothèses : les scénarios d'usage prévus seront respectés, les stratégies d'intervention seront efficaces, etc. Plusieurs auteurs ont heureusement relevé le défi de faire avancer les connaissances scientifiques quant à la modélisation des usages. On peut citer Serna-Mansoux et al. (2014b) qui proposent un modèle prenant en compte la perte d'efficacité d'un *feedback* (message incitant à adopter un comportement soutenable) au cours du temps, et donc la perte progressive du caractère écoresponsable récemment adopté face au retour du comportement habituel, encore ancré dans les automatismes. Serna-Mansoux et al. (2014a) mettent ainsi en avant l'intérêt de renouveler régulièrement les messages apportés par les mécanismes de *feedback*. Avec un objectif plus large de réaliser des modélisations dans le but d'optimiser la conception d'un produit selon des contraintes « utilisateurs », les travaux de Yannou et al. (2010) présentent une approche utilisant la satisfaction de contraintes et permettant d'obtenir des scores de "*usage coverage*" représentant à quel point le modèle obtenu correspond aux usages des différentes catégories d'utilisateurs. En modélisation encore, Simmons (2005) propose un cadre méthodologique pour décrire des modèles d'usage durant la phase de conception.

Ici, la trajectoire de la communauté scientifique a été, dans un premier temps, d'adapter au mieux le produit à l'utilisateur (*User-Centered Design*), puis de réfléchir à l'influence positive que le produit peut avoir sur son utilisation (*Design for Sustainable Behaviour*), pour finir par une volonté d'optimisation des usages. Si les stratégies et mécanismes permettant d'influencer les comportements des utilisateurs vers plus de soutenabilité sont désormais bien éprouvés, les modélisations permettant d'intégrer ces aspects dans un modèle global de cycle de vie ne sont encore qu'au stade expérimental, laissant de nombreuses opportunités de recherche ouvertes.

Fin de vie et business model

L'évolution vers une meilleure prise en compte de la fin de vie passe par des aspects extérieurs et intérieurs au produit. À l'extérieur, la présence de filières de fin de vie, de *business models* et de procédés adaptés ; à l'intérieur, la facilitation de cette fin de vie optimisée, notamment grâce à une conception modulaire du produit. La modularité est un concept que l'on retrouve parmi les principes du *Design for Excellence (Design for X)* (Meerkamm et Koch, 2005) ; c'est une réflexion supplémentaire à avoir en conception mais qui permet en fin de vie d'importantes économies, aussi bien sur le plan économique que sur le plan environnemental. Parmi les travaux réalisés sur la problématique de la

modularité, on peut citer Erixon (1996) qui utilise une approche QFD où les caractéristiques techniques sont choisies avec une emphase spéciale sur la modularité des solutions. Kamrani et Nasr (2009) proposent une méthodologie utilisant technique d'optimisation et algorithmes génétiques pour grouper des composants en modules. Tchertchian et al. (2013) proposent eux un outil (le *Modular Grouping Explorer*) permettant de déterminer quels modulent ont le plus intérêt à être remanufacturés, ou *a minima* recyclés, en fonction de leur coût et de leurs impacts environnementaux. Plus récemment, Tseng et Chang (2016) mettent en œuvre une méthodologie de conception modulaire permettant de prendre en compte et d'optimiser les opérations de désassemblage. Dans un registre plus large, Kubota et al. (2016) analysent les liens entre produits modulaires et systèmes de production modulaires dans le secteur de la fabrication automobile.

La modularité n'est pas une fin en soi ; elle ne sert qu'à favoriser les trois « R » du Df3R : *recycling, remanufacturing and reuse*. La réutilisation des produits et composants est, si l'on peut dire, l'idéal de la fin de vie. Le composant est pris d'un produit en fin de vie pour être inséré dans un produit neuf. Dans ce cas, les problématiques de fiabilité, de maintien à niveau, voire d'esthétique sont importantes pour la réussite du processus. Lo (1998) présente le *Design for Reuse* comme essentiel pour la viabilité et la rentabilité de toute l'industrie électronique ; c'est selon lui un moyen efficace de suivre le rythme des évolutions technologiques en limitant les coûts et ressources de fabrication. Gedell et Johannesson (2013) s'intéresse à l'importance de la réutilisation dans les techniques de *platform-based design* ; ils proposent une approche pour la conception de systèmes complexes configurables, composés de multiples sous-systèmes. Pour élargir le champ d'application de la réutilisation de composants électroniques, Yazdanbakhsh et al. (2014) proposent l'utilisation de composants « approximatifs », issus de la réutilisation, pouvant ne pas être totalement conformes à leur nouvelle utilisation, mais associés à des applications « résistantes aux erreurs » permettant d'obtenir des résultats satisfaisants ; le but est de favoriser la réutilisation de composants à large échelle.

Le remanufacturing peut être vu comme « un niveau en dessous » de la réutilisation. Il consiste en la récupération de composants sur un produit en fin de vie, composants qui devront passer par un procédé de remise à neuf avant d'être intégrés à un nouveau produit. En 1996, Bras et Hammond proposent une méthodologie pour mesurer le degré de « remanufacturabilité » d'un produit et mettre en œuvre les opportunités associées ; leur travail s'appuie notamment sur les principes du *Design for Assembly*. De nombreux auteurs ont ensuite couplé les principes du remanufacturing avec diverses méthodes de conception. Yang et al. (2013) proposent une approche utilisant le QFD avec une attention particulière portée sur la remanufacturabilité des solutions choisies. Soh et al. (2014) approfondissent l'importance du désassemblage et les moyens de le faciliter dans le cas de produits remanufacturables Du point de vue économique, Yalabik et al. (2014) explorent les conditions de marché favorables à la transition vers des produits remanufacturés, dans le but d'optimiser les bénéfices et les performances environnementales. Ismail et al. (2015), proposent une classification des outils dédiés à la conception de produits remanufacturables afin de guider les ingénieurs dans le choix

des outils les mieux adaptés à leurs problèmes. Banjo et al. (2015) s'interrogent sur les freins à la généralisation des principes du remanufacturing dans l'industrie et proposent l'utilisation de modèles virtuels pour faciliter l'intégration du remanufacturing dans la chaîne de valeur. Aussi dans le but de faciliter l'application des principes du remanufacturing, Yang et al. (2016) développent un outil d'aide à la décision spécifique pour répondre aux interrogations quant à des choix de matériaux, des associations de matériaux, des choix d'architecture et des choix de coating.

Une évolution du remanufacturing consiste, plutôt que de se contenter de remettre un composant à neuf entre deux utilisations, à lui apporter des améliorations pour le maintenir au niveau des évolutions technologiques. C'est ce qu'on appelle *upgradability*. Ce concept apporte une complexité supplémentaire étant donné qu'une incertitude plane sur les évolutions futures possibles des composants qui seront remplacés. Des problèmes de compatibilité entre anciens et nouveaux composants peuvent aussi se poser. Umemori et al. (2001) proposent une méthode permettant de prendre en compte ces incertitudes comme une variable du problème de planning à long terme des upgrades ; ils veulent ainsi encourager les upgrades multiples pour allonger la durée de vie des produits et réduire les quantités de déchets globales. Pour aller plus loin que les upgrades focalisées sur l'amélioration des performances du produit, Ishigami et al. (2004) élaborent une méthode pour la prise en compte d'updates fonctionnelles, ajoutant donc des nouvelles fonctionnalités au produit et lui permettant de « renouveler » son potentiel de durée de vie. Xing et Belusko proposent en 2008 une méthode utilisant techniques d'optimisation et logique floue pour faciliter l'introduction systématique des principes d'upgradabilité au sein des problèmes de conception. Plus récemment, Fukushige et al. (2012) proposent de définir des contraintes géométriques associées à un plan d'upgrade (prenant en compte les incertitudes sur les technologies futures) pour être intégrées en CAO et assurer une bonne compatibilité des upgrades avec le produit. Pialot et al. (2012) mettent en place une méthodologie pour simuler l'attractivité et les risques liés à un planning d'updates multiples. Enfin, Konstantinou et Knaack (2013) développent une boîte à outils pour intégrer les principes de l'upgradabilité dans un planning d'entretien/réparation classique ; ils l'appliquent à la rénovation de bâtiments pour l'amélioration des performances thermiques.

Le dernier « R » du Df3R est pour « Recyclage ». Dans ce dernier cas, l'intégrité du composant (et donc sa valeur et son « stock » de performance environnementale), entièrement conservée avec la réutilisation et partiellement conservée avec le remanufacturing, est détruite pour ne valoriser que les matériaux recyclables. Le tri nécessaire, suivi par les différents procédés de recyclage, font que le recyclage ne peut plus être considéré comme une fin de vie optimale. Elle n'en est pas moins nécessaire à *minima* pour éviter l'enfouissement ou l'incinération des composants ne pouvant être ni réutilisés ni remanufacturés. Dès 1994, Zussman et al. Proposent une méthodologie pour l'évaluation de la démontabilité des produits en vue de favoriser le recyclage. L'année suivante, Kriwet et al. (1995) mettent en avant l'importance de l'organisation de filières de recyclage et la coopération des différents acteurs du cycle de vie du produit pour favoriser leur bon fonctionnement. Au fil des études, les outils

centrés sur la recyclabilité deviennent de plus en plus spécialisés. Gaustad et al. (2010) développent une méthode s'appuyant sur des techniques d'optimisation pour définir la composition d'alliages métalliques spécifiques à certaines applications tout en maximisant leur recyclabilité. Des études pour l'évaluation de la recyclabilité sont aussi réalisées pour d'autres matériaux comme les composites (Perry et al., 2012), les PMMA (Kikuchi et al., 2013), etc. Ainsi, les méthodes pour l'évaluation de la recyclabilité des produits se multiplient, souvent sectorielles, avant de voir la définition de méthodes de référence plus globales, notamment avec les travaux de Maris et Froelich (2013). Certaines études s'interrogent sur les aspects plus globaux de la pression sur la disponibilité des ressources et le rôle du recyclage comme solution possible. On peut ici citer pour le cas des métaux Reck et Graedel (2012) et Reuter (2013). Dernièrement, les méthodologies de conception dédiées à favoriser la recyclabilité s'appuient sur les techniques de simulation et d'optimisation pour gérer au mieux la multitude des variables qui rend ces problématiques des plus complexes (Reuter et Schaik, 2015 ; Reuter et al., 2015).

Une difficulté récurrente des problématiques de prise en compte de la fin de vie est la question du contrôle de la vie du produit et de sa mise au rebut. Dans le cas des schémas *business to customer* l'entreprise n'a pas de contrôle sur la phase d'utilisation et la mise au rebut du produit. Il est dans ce cas très difficile de faire appliquer des stratégies de réutilisation ou de remanufacturing. Un moyen de rendre le contrôle du produit à l'entreprise est la mise en place de systèmes produit-service. Dans ces systèmes, schématiquement, l'entreprise reste propriétaire du produit et le client ne paye que pour le service associé (leasing, auto lib', locations, etc.). Il est alors beaucoup plus facile d'organiser des retours de produits dans le but d'appliquer un planning d'upgrade auquel l'utilisateur souscrit. Le concept de *product-service system* est développé à la fin des années 1990. Roy (2000) en explicite les principes et les enjeux associés en matière d'améliorations environnementales, de transition de modèle économique et de conséquences sociétales. Aurich et al. (2006) proposent une méthodologie de conception où à chaque module du produit un service associé peut être conçu ; ils veulent ainsi introduire les PSS de manière systématique en conception de produits. Morelli (2006) élabore une classification des acteurs impliqués dans la réussite de tels systèmes, de même que les outils utilisés pour les mettre en œuvre ; il propose ainsi des *guidelines* pour la mise en place de PSS. Schenkl et al. (2013) s'intéressent eux aux bouleversements qu'apportent les PSS aux processus d'innovation en entreprise ; ils étudient comment adapter ces derniers pour tirer profit des opportunités offertes par les PSS. Laperche et Picard (2013) font un travail similaire *a posteriori* en étudiant les stratégies d'éco-innovation et les PSS associés mis en place dans de grandes entreprises françaises ; ils en retirent des *guidelines* pour une transition réussie vers les PSS. Van Ostaeyen et al. (2013) proposent d'affiner la notion de fonction, primordiale au sein du concept de PSS (aussi appelé économie de fonctionnalité) ; il en résulte une nouvelle typologie de PSS basée sur leurs niveaux de fonctions.

Nous voyons que le sujet de la fin de vie est depuis longtemps un point clé de la recherche en écoconception. La démonstration des bénéfices associés aux concepts du Df3R puis l'élaboration d'applications, de méthodes et de guidelines de plus en plus précises rendent ces problématiques

incontournables dans tout problème d'écoconception. La littérature converge vers des systèmes présentant une modularité de plus en plus intelligente, de plus en plus planifiée, indispensable au bon déroulement des opérations de fin de vie. L'affinage des fonctionnements en PSS va de pair avec ces progrès et rend possible leur application. Ils imposent aux écoconcepteurs le devoir de penser au-delà de la seule conception « mécanique » et de proposer des solutions systémiques pertinentes.

Modélisation

La réussite d'une démarche d'éco-optimisation dépend grandement de la manière dont est modélisé le système considéré. Un modèle ultra précis donnera des résultats fiables à coup sûr mais aura nécessité une quantité de travail rédhibitoire. A l'inverse, un modèle trop grossier ne donnera pas des résultats suffisamment fiables et risquera de mettre en péril le bon déroulement du processus de conception. Un équilibre doit donc être trouvé entre quantité de travail nécessaire à la modélisation et précision du modèle.

Wang et Shan (2007) proposent une étude bibliographique des techniques de méta modélisations créées pour faire face à ce problème. Elles permettent d'obtenir rapidement des modèles relativement grossiers et permettent de déceler efficacement les points à développer davantage pour amener la précision du modèle à un niveau satisfaisant.

La technique générale à laquelle on pense en premier lieu lorsque l'on parle d'approche empirique est sans conteste l'application du principe de Pareto. Bien connu, il consiste à identifier un groupe restreint de causes responsable de la majorité des effets. Appliqué à une démarche d'optimisation, cela revient par exemple à ne modéliser que les 20 % des éléments du produit responsables à 80 % des niveaux de performances finaux (sous-entendu que ces proportions soient en effet constatées au sein du produit). Cette approche simpliste montre logiquement des lacunes importantes. Elle ne permet par exemple pas d'identifier les interrelations entre les éléments du système qui font que certains éléments, bien qu'apparemment peu influents sur les performances finales, jouent tout de même un rôle important de par leur influence sur d'autres éléments.

Cavalucci et Lutz (2000) proposent une méthode de conception intuitive tenant compte des habitudes des concepteurs. Selon le profil du concepteur et du projet, ils font des recommandations sur la ou les méthodes ou la combinaison de méthodes à utiliser parmi un panel de méthodes de conception issues de la littérature scientifique.

Un parallèle peut être intéressant à faire avec le domaine de l'évaluation environnementale lorsque l'on cherche à établir une méthodologie d'éco-optimisation facile à mettre en œuvre. Le domaine de l'évaluation environnementale connaît un grand essor depuis l'apparition de logiciels d'ACV ergonomiques et la disponibilité de bases de données très fournies. Cela influe sur les évolutions réglementaires qui tendent à inclure de plus en plus souvent des impératifs en matière d'évaluation environnementale pour une grande variété de produits. Par conséquent, les concepteurs concernés

peuvent être amenés à réaliser eux-mêmes les évaluations environnementales au cours du processus de conception. Pour les y aider, des méthodologies d'ACV simplifiées ont vu le jour dans la littérature scientifique. Elles visent à se concentrer sur les données critiques du problème afin d'obtenir des résultats pertinents avec un temps de travail réduit.

Dans cette optique, Hochschorner et Finnveden (2003) évaluent deux méthodes d'ACV simplifiées et montrent les limitations des méthodes qualitatives dans ce domaine. Hur et al. (2005) comparent ACV simplifiées avec des méthodes matricielles pour identifier les aspects environnementaux forts d'un produit ; ils démontrent l'efficacité des méthodes d'ACV en la matière mais exposent leurs limites quant à l'identification de potentiels d'amélioration. Valkama et Keskinen (2008) comparent trois méthodes d'ACV simplifiées appliquées à l'écoconception de produits électroniques ; ils concluent que ces méthodes s'avèrent efficaces notamment de par la reproductibilité des modèles. Bribian et al. (2009) réalisent un état de l'art des méthodes d'ACV simplifiées pour la certification des bâtiments ; ils soulignent l'importance de la modélisation environnementale comme facteur de progrès et d'innovation car favorisant la recherche de solutions optimales complexes.

Perspectives

Nous avons vu que, dans les quatre branches de la littérature scientifique explorée, des méthodes et outils performants existent. Cependant, la multiplicité des outils ne permet pas nécessairement de mener à bien un travail d'écoconception optimisé. Des problèmes de compatibilité des résultats entre certains outils peuvent exister. Il peut être difficile d'intégrer dans chaque outil la complexité globale du système, aussi liée aux autres outils. L'opportunité que nous apercevons ici est une tentative d'unification, une cristallisation des techniques les plus performantes au sein d'une méthodologie d'optimisation générale, prenant en compte avec la précision nécessaire les différentes étapes du cycle de vie des produits, intégrant les aspects plus larges de désirabilité et de *business model* et incluant les multiples interrelations existant entre ces aspects.

Méthodologie générale

Après avoir formulé les trois questions de recherche qui cadrent le travail de thèse et après avoir exploré la littérature scientifique en conséquence, une méthodologie générale est ici proposée afin de répondre aux questions de recherches. Cette méthodologie est composée de trois axes de travail, chacun centré sur l'une des questions de recherche.

Le premier axe se focalise sur l'identification, la quantification et la modélisation des usages réels d'un produit et de leurs conséquences environnementales ; il développe notamment le concept de dérive d'usage et fait appel aux techniques d'ACV pour quantifier les conséquences environnementales des dérives d'usage. Le deuxième axe de travail concerne l'élaboration d'une méthode pour l'optimisation multicritère du cycle de vie de produits prenant en compte l'attractivité produit-client ; il fait appel aux techniques du QFD, de l'optimisation par Satisfaction de Contraintes et de l'ACV. Le troisième et dernier axe porte sur la modélisation de la sélection d'alternatives de conception simultanée à

l'optimisation de la conception du produit. Il vise à définir une sélection d'alternatives optimisées en tenant compte de leurs liens avec l'ensemble des variables de conception du produit.

Ces trois axes de travail, de même que les interrelations qui les lient, sont développés plus en détail dans les sections suivantes. D'une manière globale, le deuxième axe de travail constitue un cadre méthodologique pour l'optimisation multi critères du cycle de vie des produits, cadre sur lequel viennent se greffer les deux axes restants afin d'améliorer la performance et le réalisme de l'ensemble de la modélisation. Le résultat attendu est une méthodologie globale permettant de prendre en compte l'ensemble des complexités liées au cycle de vie des produits avec une précision satisfaisante.

Axe 1: Identification, quantification et modélisation des usages réels d'un produit et de leurs conséquences environnementales, étude de la pertinence environnementale des solutions visant à influencer les comportements des utilisateurs.

Le premier axe de travail répond à la question de recherche « Comment élaborer une modélisation réaliste des usages d'un produit, mettant en avant le caractère plus ou moins soutenable des différents segments d'utilisateurs, et quelles solutions pour influencer positivement ces usages ? ». Il a fait l'objet d'une publication dans la revue *Journal of Cleaner Production* (Popoff et al., 2016).

Cet axe de travail est concentré sur la question complexe des usages qui sont faits d'un produit par les utilisateurs. Le modèle classique qui consiste à ne considérer qu'un seul schéma d'usage pour un produit, celui élaboré par les concepteurs, n'est parfois pas suffisant pour retranscrire les impacts réels de l'utilisation. Un produit peut en effet être soumis à une diversité d'usages venant d'une diversité d'utilisateurs. Lorsque ces usages dévient trop de l'usage prescrit, des surimpacts environnementaux sont susceptibles d'apparaître. Ce concept a été formalisé par Serna-Mansoux et al. (2014a) sous l'appellation de Dérive d'Usage Environnementale.

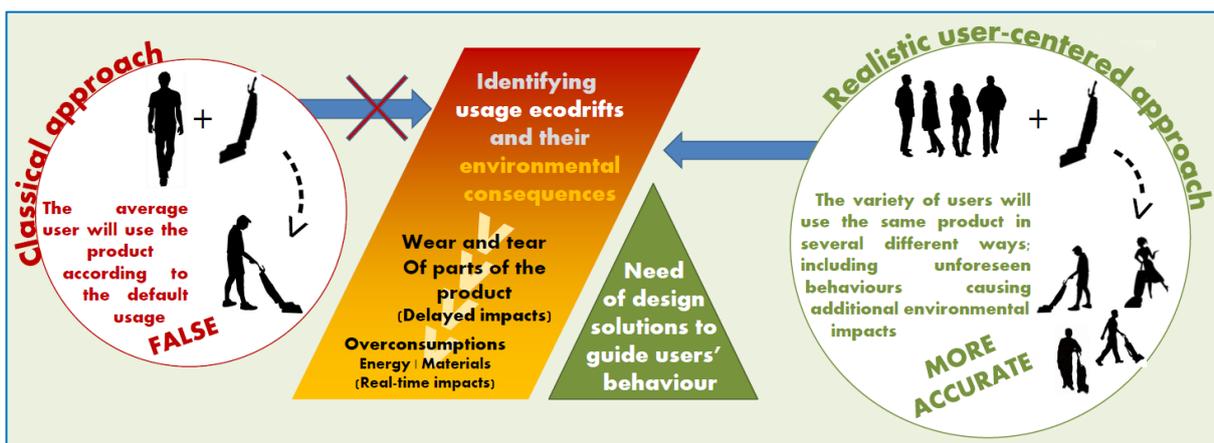


Fig. 23. Approche classique VS approche centrée utilisateur (extrait d'une présentation de Popoff 2016 à la conférence Life Cycle Management 2015 à Bordeaux)

Si l'existence de comportements à forts impacts est avérée, le cœur du problème est de connaître la proportion d'utilisateurs qui réalise ces DUE afin d'élaborer les stratégies permettant d'y remédier. Il est alors utile de séparer les utilisateurs en différents segments, définis selon des critères d'usage, de

personnalité, de connaissance, de conscience environnementale, etc., auxquels peuvent être dédiées des stratégies de correction spécifiques. La difficulté est alors de trouver quelle combinaison et quelle organisation des stratégies d'intervention permet de corriger au mieux un maximum des comportements des utilisateurs des différents segments.

En premier lieu, la question de l'identification et de la quantification des DUE se pose. Ces étapes se réalisent par des études auprès des utilisateurs afin de définir leurs usages et de créer les éventuels segments d'utilisateurs. Ensuite, les DUE repérées peuvent être reproduites en laboratoire afin de quantifier les impacts environnementaux associés. Une fois ces travaux réalisés, il est possible de savoir quels segments d'utilisateurs et quels usages créent le plus d'impacts, et lesquels doivent donc être traités en priorité par les stratégies d'intervention.

Le choix des stratégies d'intervention a lui aussi son importance vu que les personnes des différents segment d'utilisateurs sont susceptibles d'être plus ou moins sensibles à certaines stratégies, voire complètement réfractaires à certaines. Plusieurs stratégies complémentaires peuvent avoir à être employées pour obtenir des résultats satisfaisants.

Bien sûr, les impacts environnementaux additionnels occasionnés par la présence même des stratégies d'intervention doivent être calculés. Il peut s'agir de la fabrication des matériels liés à la stratégie de même que des énergies de fonctionnement.

A la différence des stratégies qui viennent s'ajouter à un produit déjà fini, il est possible de réaliser des modifications directement au sein de la structure du produit pour modifier ou encourager des usages plus durables. Cela concerne l'ergonomie de l'appareil, la conception et le choix des informations dispensées sur les interfaces, la modification, l'ajout ou le retrait de fonctionnalités, le choix des composants, etc.

Ce premier axe de travail est donc un zoom détaillé sur la phase d'utilisation des produits. Une difficulté supplémentaire est, une fois les données sur les usages et leurs conséquences sur la conception recueillis, de les intégrer au modèle par contraintes élaborer avec le deuxième axe de travail.

Axe 2: Une méthode pour l'optimisation multi-critère du cycle de vie de produits prenant en compte l'attractivité produit-client.

Le premier axe de travail répond à la question de recherche « Comment, et avec quels outils, élaborer une méthodologie transversale pour l'optimisation environnementale et multicritère du cycle de vie des produits prenant en compte les aspects d'attractivité envers les utilisateurs ? ». Il fait l'objet d'un projet de publication dans la revue *Journal of Industrial Ecology*.

Ce deuxième axe concerne des aspects globaux de la conception de produit. Il s'intéresse à l'ensemble des interactions entre le produit et l'environnement extérieur, de même qu'à l'ensemble des moyens

permettant d'agir positivement sur ces performances environnementales. Cela passe notamment par des aspects dépassant le cadre de la conception traditionnelle. La mise en place de *business models* durables ainsi que l'amélioration de l'attractivité du produit pour favoriser sa diffusion et grandir son impact sont des leviers importants qui doivent être pensés dès les premières phases de la conception ou de la reconception de produits.

Au vu de l'étude bibliographique précédemment présentée, le choix de la technique pour traiter le sujet de l'attractivité des produits s'est naturellement porté vers la famille des méthodes QFD. De telles techniques sont idéales pour décrire un problème de conception de manière condensée. Elles ont de plus l'avantage de balayer un large spectre de compétences et d'expériences relatives à l'ensemble des acteurs en lien avec la vie du produit. Elles permettent de cristalliser les informations utiles à la conception du produit et de définir des stratégies adaptées pour son succès sur son marché.

L'emploi des techniques issues du QFD, de par leur souplesse, permet de rassembler un grand nombre de données concernant la vie du produit. Ce sont donc des outils très intéressants pour la préparation de la modélisation d'un produit où il est important de connaître quelles sont les données importantes à modéliser. Dans la méthodologie développée avec ce premier axe, les caractéristiques techniques, de même que les caractéristiques des composants, considérées comme les plus importantes pour la bonne conception du produit après application des techniques QFD, sont choisies comme piliers de la modélisation par contrainte.

La modélisation est donc pilotée par les conclusions du QFD qui indiquent quelles caractéristiques du produit sont les plus importantes. Selon les scores d'importance obtenus, certaines caractéristiques pourront être modélisées plus finement que d'autres et leurs conséquences sur la vie du produit seront alors mieux appréciées.

L'intérêt de la modélisation est d'obtenir le paramétrage idéal du produit pour atteindre un objectif donné. Pour élaborer cet objectif, là aussi, l'utilisation des résultats du QFD semble pertinente. L'objectif de conception peut comporter plusieurs aspects ; il peut par exemple à la fois demander une minimisation d'une masse tout en demandant une minimisation d'un coût, deux demandes souvent contradictoires. La pondération de ses sous-objectifs en fonction des importances qui leur ont été attribuées dans le QFD, associée à l'algorithme d'optimisation, doit permettre d'obtenir des compromis de conception satisfaisant l'ensemble des acteurs.

Pour mener à bien une telle optimisation, les données de coûts et de masses doivent être incluses au modèle. Il en va de même pour les données environnementales qui, grâce à l'utilisation de logiciels d'ACV, peuvent être attribuées à différents éléments du modèle représentant des quantités de pièces, de composants, de matériaux, etc.

Ce deuxième axe de travail propose donc de construire une structure méthodologique pour la modélisation globale de produits. Une fois ce « squelette » établi, des « organes » plus spécialisés sur des points précis de la vie du produit doivent pouvoir facilement se greffer dessus.

Axe 3: Détermination du panel d'alternatives de conception pertinent à intégrer à la démarche d'éco-optimisation

Le troisième et dernier axe de travail répond à la question de recherche « Comment, en phase amont de conception, déterminer le panel d'alternatives de conception pertinent à modéliser dans le cadre de la démarche d'éco-optimisation ? ». Il fait l'objet d'un projet de publication dans la revue *Journal of Mechanical Design*.

Le processus de conception d'un produit passe nécessairement par une étape de sélection d'alternatives qui décidera quels modules et composants seront associés au sein du produit final. Cette sélection peut avoir lieu parmi des bibliothèques regroupant un grand nombre de composants. Sélectionner une unique solution alors qu'un ensemble de composants proches présentent des caractéristiques similaires devient alors problématique et souvent arbitraire. Dans le cas d'une sélection intuitive, il existe un risque de négliger certains critères de décision qui peuvent se révéler importants pour les performances du cycle de vie du produit final. De plus, la sélection d'un composant peut dépendre des valeurs du reste des variables de conception du système : avec un certain paramétrage global, la solution 1 du module A sera la meilleure alors qu'avec un paramétrage différent, une autre solution peut devenir meilleure. Il y a donc nécessité d'effectuer la sélection d'alternatives simultanément à l'optimisation du système complet. Enfin, le choix d'une certaine alternative pour un module peut influencer, voire conditionner le choix d'une alternative précise pour un autre module. Ces liens contraignants qui existent entre modules peuvent être complexes à prendre en compte et encore plus à optimiser sans outil adapter et sans les inclure dans la simultanéité de l'optimisation globale. Nous proposons donc d'introduire des relations et des scores de compatibilité entre alternatives de différents modules afin de favoriser la configuration optimale du système au niveau modulaire.

Articulation et complémentarité des axes de travail

Les trois axes de travail définis dans les sections précédentes concernent des aspects distincts du processus de conception de produits : d'une part, la prise en compte des diversités d'utilisation ainsi que les solutions permettant d'orienter le comportement des utilisateurs et, d'autre part, la macro modélisation du produit et de son cycle de vie dans le but d'optimiser ses performances, notamment environnementales. Dans le deuxième axe de travail, l'utilisateur reste au centre de la méthode grâce à l'emploi du QFD. Le travail proposé se veut donc être une réflexion autour des manières de concevoir un produit et son cycle de vie en adoptant le point de vue final de l'utilisateur.

Les trois axes de travail se veulent aussi complémentaires de par leur différents types de conception auxquels ils sont associés (figure 24). Le travail réalisé sur les éco-feedbacks est fait *a posteriori*. Le

produit existe déjà et l'on vient y greffer un module permettant de transmettre des informations à l'utilisateur quant aux meilleurs comportements à adopter. Ces solutions sont donc peu intégrées au produit et ne font pas l'objet d'une réflexion d'ensemble au moment de sa conception. L'espace de conception n'est pas exploré et coïncide avec une solution déjà pressentie ; on est dans le cas d'un processus de conception que l'on peut qualifier de routinier. Le travail associant CSP et QFD se déroule, lui, au cours des phases de conception architecturale et de conception détaillée. Il apporte des réponses en matière de choix d'architecture et de dimensionnement du produit. Il permet une exploration restreinte de l'espace de conception autour de la solution spécifique qui a été modélisée. Il permet aux concepteurs et ingénieurs de déterminer les paramétrages optimaux des variables de conception pour maximiser les performances du cycle de vie du produit. Cette exploration vertueuse peut être qualifiée de processus de "conception améliorante". Enfin, le travail réalisé sur la problématique de la sélection d'alternatives se positionne un cran en amont, au niveau des phases de définition fonctionnelle et de conception globale. Il propose une modélisation "gros grain" du système et de ses alternatives. L'espace de conception exploré est beaucoup plus grand qu'avec l'axe de travail précédent et le détail des résultats obtenus est moindre. Cette méthode permet de comparer une grande diversité d'alternatives de conception en obtenant des résultats pertinents quant à leurs

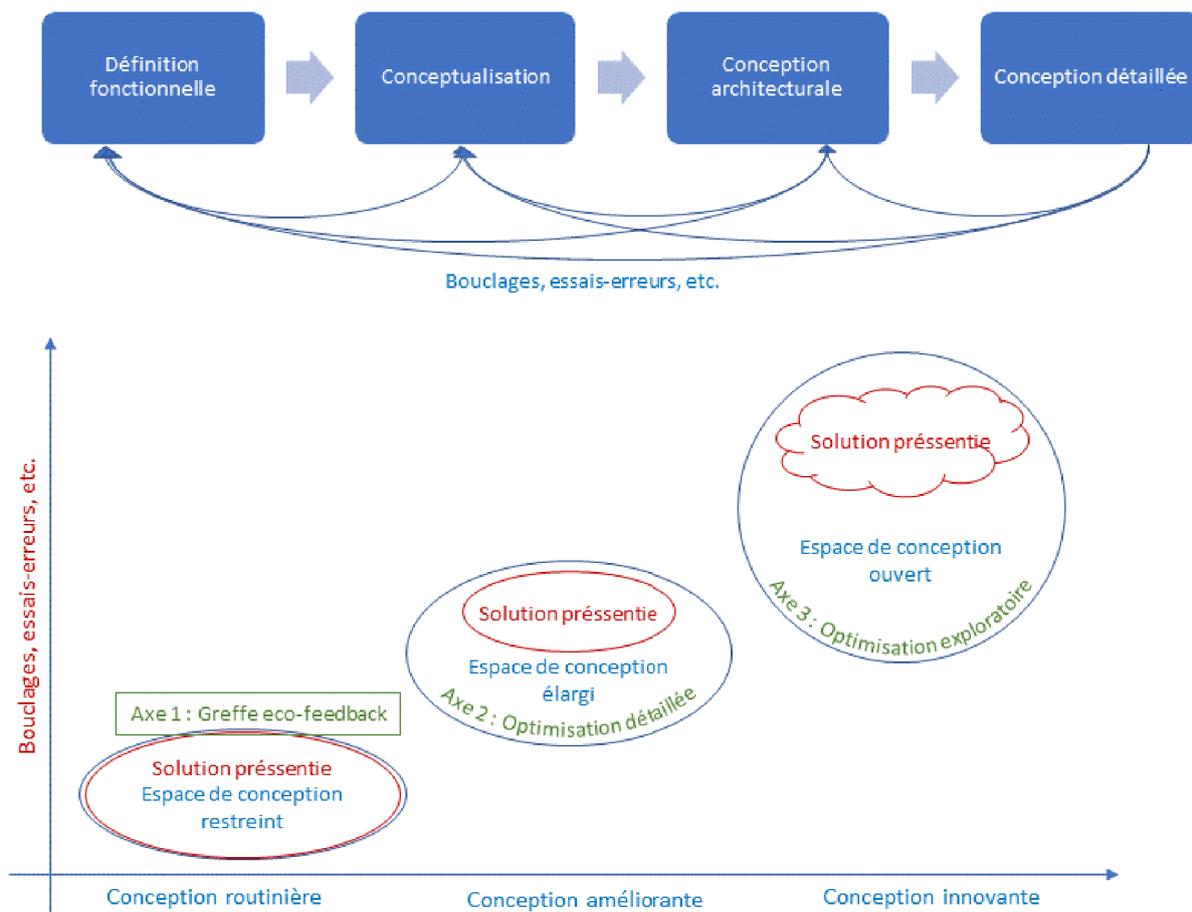


Fig. 24. Illustration de la complémentarité des trois axes de travail

conséquences sur les performances du cycle de vie du produit. Cet axe se positionne dans une démarche qui est davantage tournée vers l'innovation.

Validation et application

La méthodologie développée dans ce document de thèse a fait l'objet de plusieurs applications sur des cas concrets afin de tester son efficacité et sa pertinence. Le doctorat ayant été financé dans le cadre du projet FUI 17 « Inovanex » porté par l'entreprise Orange Marine basée à La Ciotat (83), la majeure partie des applications s'est faite sur le produit Inovanex, une annexe de bateau innovante, développée par l'entreprise.

La volonté de l'entreprise de reconcevoir en profondeur leur gamme d'annexes fait d'Inovanex un produit idéal dans le cadre de l'expérimentation d'une démarche d'éco-optimisation. L'architecture et les matériaux du produit, de même que l'ensemble de ses composants forment un ensemble de variables de conception qui engendrent une combinatoire extrêmement vaste pour arriver au résultat de conception final. Cette combinatoire étant bien trop complexe pour être appréhendée sans outils dédiés. Le principe des démarches d'optimisation est de modéliser cette combinatoire grâce à des ensembles de variables, de domaines de valeurs et de contraintes qui représentent le problème. Une fois ce modèle établi, les algorithmes de recherche d'optimum réalisent le travail d'exploration de l'ensemble de la combinatoire du problème pour y déceler les meilleures solutions au regard d'un objectif préétabli. Le problème de la reconception innovante de l'annexe de bateau présente ces éléments de combinatoire qui en font un cas de choix pour l'expérimentation de la méthode d'éco-optimisation innovante développée dans cette thèse.

Pour les besoins de la recherche, un autre produit a été étudié dans le cadre du premier axe de travail centré sur la phase d'utilisation des produits. L'aspirateur balai sans fil a été choisi de par le rôle important que jouent les comportements des utilisateurs sur les performances globales du cycle de vie du produit. En effet, selon l'utilisation qui est faite de ce type de produit, on constate que ceux-ci voient leur durée de vie diminuer de manière anormale. Cette diminution, associée à des surconsommations d'énergies et de consommables, peut rendre le bilan environnemental du produit largement moins bon que ce qu'il pourrait être avec une utilisation optimale.

La variété des comportements associée au passage d'aspirateur, de même que les différentes perceptions que peuvent avoir les utilisateurs de cette tâche, permettent une exploration intéressante de l'ensemble des variables côté utilisateur dans le but d'identifier leurs liens avec les variations des performances environnementales du produit.

Pour garantir la qualité des résultats, dans la mesure du possible, les données utilisées sont mesurées *in situ* ou validées par des autorités compétentes en la matière (entreprises partenaires, données issues de la littérature scientifique, etc.).

Références

- Akao, Y., 2004. Quality function deployment.
- Aurich, J.C., Fuchs, C., Wagenknecht, C., 2006. Life cycle oriented design of technical Product-Service Systems. *Journal of Cleaner Production*, Product Service Systems: reviewing achievements and refining the research agenda 14, 1480–1494. doi:10.1016/j.jclepro.2006.01.019
- Azapagic, A., Clift, R., 1999. The application of life cycle assessment to process optimisation. *Computers & Chemical Engineering* 23, 1509–1526.
- Azapagic, Adisa, Clift, R., 1999a. Life cycle assessment and multiobjective optimisation. *Journal of Cleaner Production* 7, 135–143.
- Azapagic, Adisa, Clift, R., 1999b. Life cycle assessment as a tool for improving process performance: a case study on boron products. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 4, 133–142.
- Banjo, O., Jain, A., Chen, F., 2015. Model based virtual engineering approach to remanufacturing design, in: 2015 Science and Information Conference (SAI). Presented at the 2015 Science and Information Conference (SAI), pp. 916–920. doi:10.1109/SAI.2015.7237251
- Blevis, E., 2007. Sustainable Interaction Design: Invention & Disposal, Renewal & Reuse, in: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '07. ACM, New York, NY, USA, pp. 503–512. doi:10.1145/1240624.1240705
- Bribián, I.Z., Usón, A.A., Scarpellini, S., 2009. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. *Building and Environment* 44, 2510–2520.
- Cavallucci, D., Lutz, P., 2000. Intuitive design method (IDM), a new approach on design methods integration, in: Proceeding of ICAD2000: First International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA-June. pp. 21–23.
- Cristofari, M., Deshmukh, A., Wang, B., 1996. Green quality function deployment, in: Proceedings of the 4th International Conference on Environmentally Conscious Design and Manufacturing. pp. 297–304.
- Dell'Isola, A.J., 1966. Value Engineering in Construction. *Civil Engineering*.
- Desmet, P.M.A., Porcelijn, R., Dijk, M.B. van, 2007. Emotional Design; Application of a Research-Based Design Approach. *Know Techn Pol* 20, 141. doi:10.1007/s12130-007-9018-4
- Eckman, M., Wagner, J., 1994. Judging the Attractiveness of Product Design: the Effect of Visual Attributes and Consumer Characteristics. *NA - Advances in Consumer Research Volume 21*.
- Endsley, M.R., 2016. *Designing for Situation Awareness: An Approach to User-Centered Design*, Second Edition. CRC Press.
- Erixon, G., 1996. Design for Modularity, in: Huang, G.Q. (Ed.), *Design for X*. Springer Netherlands, pp. 356–379. doi:10.1007/978-94-011-3985-4_18
- Francis, F., 2009. Environmentally conscious quality function deployment - A new approach for green manufacturing, in: 2009 International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications. Presented at the 2009 International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications, pp. 340–343. doi:10.1109/ACTEA.2009.5227936
- Fukushige, S., Arino, M., Umeda, Y., 2012. Computer-aided Design for Product Upgradability under Geometric Constraints, in: Matsumoto, D.M., Umeda, P.Y., Masui, D.K., Fukushige, D.S. (Eds.), *Design for Innovative Value Towards a Sustainable Society*. Springer Netherlands, pp. 828–831. doi:10.1007/978-94-007-3010-6_169
- Gaustad, G., Olivetti, E., Kirchain, R., 2010. Design for Recycling. *Journal of Industrial Ecology* 14, 286–308. doi:10.1111/j.1530-9290.2010.00229.x
- Gedell, S., Johannesson, H., 2013. Design rationale and system description aspects in product platform design: Focusing reuse in the design lifecycle phase. *Concurrent Engineering* 21, 39–53. doi:10.1177/1063293X12469216

- Goellner, M., Garrett, L., Warell, A., Adank, R., Parker, T., 2010. "Design for Desirability"—Postgraduate Collaboration between Academia and SME Industry, in: Proceedings of ConnectED 2010, the 2nd International Conference on Design Education.
- Grevet, C., Mankoff, J., Anderson, S.D., 2010. Design and Evaluation of a Social Visualization Aimed at Encouraging Sustainable Behavior, in: 2010 43rd Hawaii International Conference on System Sciences. Presented at the 2010 43rd Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 1–8. doi:10.1109/HICSS.2010.135
- Halog, A., Schultmann, F., Rentz, O., 2001. Using quality function deployment for technique selection for optimum environmental performance improvement. *Journal of Cleaner Production* 9, 387–394. doi:10.1016/S0959-6526(00)00080-9
- Hekkert, P., 2006. Design aesthetics: principles of pleasure in design. *Psychology science* 48, 157.
- Hochschorner, E., Finnveden, G., 2003. Evaluation of two simplified Life Cycle assessment methods. *Int J LCA* 8, 119. doi:10.1007/BF02978456
- Huang, Y., Chen, C.-H., Khoo, L.P., 2012. Kansei clustering for emotional design using a combined design structure matrix. *International Journal of Industrial Ergonomics* 42, 416–427. doi:10.1016/j.ergon.2012.05.003
- Hur, T., Lee, J., Ryu, J., Kwon, E., 2005. Simplified LCA and matrix methods in identifying the environmental aspects of a product system. *Journal of environmental Management* 75, 229–237.
- Ishigami, Y., Yagi, H., Kondoh, S., Umeda, Y., Shimomura, Y., Yoshioka, M., 2003. Development of a design methodology for upgradability involving changes of functions, in: 2003 EcoDesign 3rd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing. Presented at the 2003 EcoDesign 3rd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, pp. 235–242. doi:10.1109/ECODIM.2003.1322669
- Ismail, N.H., Mandil, G., Zwolinski, P., 2015. Analysis of the existing design for remanufacturing tools: A first step toward an integrated design platform for remanufacturing, in: ICOR- International Conference on Remanufacturing. Amsterdam, Netherlands, pp. 408–425.
- Jokela, T., Iivari, N., Matero, J., Karukka, M., 2003. The Standard of User-centered Design and the Standard Definition of Usability: Analyzing ISO 13407 Against ISO 9241-11, in: Proceedings of the Latin American Conference on Human-Computer Interaction, CLIHC '03. ACM, New York, NY, USA, pp. 53–60. doi:10.1145/944519.944525
- Kamrani, A.K., Nasr, E.A., 2009. Design for Modularity, in: *Engineering Design and Rapid Prototyping*. Springer US, pp. 87–121. doi:10.1007/978-0-387-95863-7_4
- Khalid, H.M., Helander, M.G., 2006. Customer Emotional Needs in Product Design. *Concurrent Engineering* 14, 197–206. doi:10.1177/1063293X06068387
- Kikuchi, Y., Hirao, M., Ookubo, T., Sasaki, A., 2014. Design of recycling system for poly(methyl methacrylate) (PMMA). Part 1: recycling scenario analysis. *Int J Life Cycle Assess* 19, 120–129. doi:10.1007/s11367-013-0624-y
- Konstantinou, T., Knaack, U., 2013. An approach to integrate energy efficiency upgrade into refurbishment design process, applied in two case-study buildings in Northern European climate. *Energy and Buildings* 59, 301–309. doi:10.1016/j.enbuild.2012.12.023
- Kramer, J., Noronha, S., Vergo, J., 2000. A User-centered Design Approach to Personalization. *Commun. ACM* 43, 44–48. doi:10.1145/345124.345139
- Kriwet, A., Zussman, E., Seliger, G., 1995. Systematic integration of design-for-recycling into product design. *International Journal of Production Economics, Collaborative integration* 38, 15–22. doi:10.1016/0925-5273(95)99062-A
- Kubota, F.I., Hsuan, J., Cauchick-Miguel, P.A., 2016. Theoretical analysis of the relationships between modularity in design and modularity in production. *Int J Adv Manuf Technol* 1–16. doi:10.1007/s00170-016-9238-4
- Kuo, T.-C., Wu, H.-H., Shieh, J.-I., 2009. Integration of environmental considerations in quality function deployment by using fuzzy logic. *Expert Systems with Applications* 36, 7148–7156. doi:10.1016/j.eswa.2008.08.029

- Laperche, B., Picard, F., 2013. Environmental constraints, Product-Service Systems development and impacts on innovation management: learning from manufacturing firms in the French context. *Journal of Cleaner Production* 53, 118–128. doi:10.1016/j.jclepro.2013.03.047
- Lilley, D., 2009. Design for sustainable behaviour: strategies and perceptions. *Design Studies* 30, 704–720. doi:10.1016/j.destud.2009.05.001
- Lo, K.C., 1998. Design for reuse, in: IEE Colloquium on Systems on a Chip (Ref. No. 1998/439). Presented at the IEE Colloquium on Systems on a Chip (Ref. No. 1998/439), p. 11/1-11/6. doi:10.1049/ic:19980665
- Lockton, D., Harrison, D., Stanton, N., 2008. Making the user more efficient: design for sustainable behaviour. *International Journal of Sustainable Engineering* 1, 3–8. doi:10.1080/19397030802131068
- Maris, E., Froelich, D., 2013. Critical Analysis of Existing Recyclability Assessment Methods for New Products in Order to Define a Reference Method, in: TMS Annual Meeting. pp. 202–216. doi:10.1002/9781118679401.ch22
- Markeset, T., Kumar, U., 2001. R amp;M and risk-analysis tools in product design, to reduce life-cycle cost and improve attractiveness, in: Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2001 Proceedings. International Symposium on Product Quality and Integrity (Cat. No.01CH37179). Presented at the Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2001 Proceedings. International Symposium on Product Quality and Integrity (Cat. No.01CH37179), pp. 116–122. doi:10.1109/RAMS.2001.902452
- Masui, K., Sakao, T., Inaba, A., 2001. Quality function deployment for environment: QFDE (1st report)- a methodology in early stage of DfE, in: Proceedings Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing. Presented at the Proceedings Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, pp. 852–857. doi:10.1109/.2001.992480
- McKenzie-Mohr, D., 2013. *Fostering Sustainable Behavior: An Introduction to Community-Based Social Marketing*. New Society Publishers.
- Meerkamm, H., Koch, M., 2005. Design for X, in: CEng, J.C.M., , MIEE, MSc, C.E. (Eds.), *Design Process Improvement*. Springer London, pp. 306–323. doi:10.1007/978-1-84628-061-0_13
- Mehta, C., Wang, B., 2001. Green quality function deployment III: a methodology for developing environmentally conscious products. *Journal of design and manufacturing automation* 1, 1–16.
- Millet, D., Bistagnino, L., Lanzavecchia, C., Camous, R., Poldma, T., 2007. Does the potential of the use of LCA match the design team needs? *Journal of cleaner production* 15, 335–346.
- Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan, 2010. kansei initiative -from Material Fulfillment to Emotional Fulfillment/METI Ministry of Economy, Trade and Industry [WWW Document]. URL http://www.meti.go.jp/english/policy/mono_info_service/mono/kansei2009/ (accessed 12.9.16).
- Morelli, N., 2006. Developing new product service systems (PSS): methodologies and operational tools. *Journal of Cleaner Production, Product Service Systems: reviewing achievements and refining the research agenda* 14, 1495–1501. doi:10.1016/j.jclepro.2006.01.023
- Norman, D.A., 2005. *Emotional Design: Why We Love (or Hate) Everyday Things*. Basic Books.
- Perry, N., Bernard, A., Laroche, F., Pompidou, S., 2012. Improving design for recycling – Application to composites. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61, 151–154. doi:10.1016/j.cirp.2012.03.081
- Pialot, O., Millet, D., Tchertchian, N., 2012. How to explore scenarios of multiple upgrade cycles for sustainable product innovation: the “Upgrade Cycle Explorer” tool. *Journal of Cleaner Production* 22, 19–31. doi:10.1016/j.jclepro.2011.10.001
- Pieragostini, C., Mussati, M.C., Aguirre, P., 2012. On process optimization considering LCA methodology. *Journal of Environmental Management* 96, 43–54.
- Popoff, A., Millet, D., Pialot, O., 2016. A method for identifying and quantifying Usage EcoDrifts. *Journal of Cleaner Production* 137, 527–536.

- Ramanathan, R., Yunfeng, J., 2009. Incorporating cost and environmental factors in quality function deployment using data envelopment analysis. *Omega* 37, 711–723. doi:10.1016/j.omega.2007.12.003
- Reck, B.K., Graedel, T.E., 2012. Challenges in Metal Recycling. *Science* 337, 690–695. doi:10.1126/science.1217501
- Reuter, M., Hudson, C., Van Schaik, A., Heiskanen, K., Meskers, C., Hagelüken, C., 2013. Metal recycling: Opportunities, limits, infrastructure. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel, UNEP.
- Reuter, M.A., Schaik, A. van, 2015. Product-Centric Simulation-Based Design for Recycling: Case of LED Lamp Recycling. *J. Sustain. Metall.* 1, 4–28. doi:10.1007/s40831-014-0006-0
- Reuter, M.A., Schaik, A. van, Gediga, J., 2015. Simulation-based design for resource efficiency of metal production and recycling systems: Cases - copper production and recycling, e-waste (LED lamps) and nickel pig iron. *Int J Life Cycle Assess* 20, 671–693. doi:10.1007/s11367-015-0860-4
- Roy, R., 2000. Sustainable product-service systems. *Futures* 32, 289–299. doi:10.1016/S0016-3287(99)00098-1
- Schenkl, S.A., Behncke, F.G.H., Hepperle, C., Langer, S., Lindemann, U., 2013. Managing Cycles of Innovation Processes of Product-Service Systems, in: 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Presented at the 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 918–923. doi:10.1109/SMC.2013.161
- Serna-Mansoux, L., Chapotot, E., Millet, D., Minel, S., 2014a. Study of user behaviour after eco-use feedback: the Green-Use Learning Cycle (GULC) as a new strategy for product eco-design. *Int J Interact Des Manuf* 8, 43–54. doi:10.1007/s12008-013-0192-1
- Serna-Mansoux, L., Popoff, A., Millet, D., 2014b. A Simplified Model to Include Dynamic Product-User Interaction in the Eco-Design Process. *Journal of Industrial Ecology* 18, 529–544.
- Simmons, E., 2005. The usage model: a structure for richly describing product usage during design and development. *IEEE*, pp. 403–407. doi:10.1109/RE.2005.73
- Smith, K.L., Cornelissen, P.L., Tovée, M.J., 2007. Color 3D bodies and judgements of human female attractiveness. *Evolution and Human behavior* 28, 48–54.
- Soh, S.L., Ong, S.K., Nee, A.Y.C., 2014. Design for Disassembly for Remanufacturing: Methodology and Technology. *Procedia CIRP*, 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering 15, 407–412. doi:10.1016/j.procir.2014.06.053
- Tchertchian, N., Millet, D., Pialot, O., 2013. Modifying module boundaries to design remanufacturable products: the modular grouping explorer tool. *Journal of Engineering Design* 24, 546–574. doi:10.1080/09544828.2013.776671
- Tseng, H.E., Chang, S.H., 2016. Life Cycle Design through Modularity and Disassembly, in: 2016 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C). Presented at the 2016 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C), pp. 772–775. doi:10.1109/IS3C.2016.197
- Umehori, Y., Kondoh, S., Umeda, Y., Shimomura, Y., Yoshioka, M., 2001. Design for upgradable products considering future uncertainty, in: Proceedings Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing. Presented at the Proceedings Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, pp. 87–92. doi:10.1109/.2001.992322
- Valkama, J., Keskinen, M., 2008. Comparison of simplified LCA variations for three LCA cases of electronic products from the ecodesign point of view, in: 2008 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. Presented at the 2008 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, pp. 1–6. doi:10.1109/ISEE.2008.4562923
- Van Ostaeyen, J., Van Horenbeek, A., Pintelon, L., Duflou, J.R., 2013. A refined typology of product–service systems based on functional hierarchy modeling. *Journal of Cleaner Production* 51, 261–276. doi:10.1016/j.jclepro.2013.01.036
- Wang, G.G., Shan, S., 2007. Review of metamodeling techniques in support of engineering design optimization. *Journal of Mechanical design* 129, 370–380.

- Wever, R., Kuijk, J. van, Boks, C., 2008. User-centred design for sustainable behaviour. *International Journal of Sustainable Engineering* 1, 9–20. doi:10.1080/19397030802166205
- Yalabik, B., Chhajed, D., Petruzzi, N.C., 2014. Product and sales contract design in remanufacturing. *International Journal of Production Economics* 154, 299–312. doi:10.1016/j.ijpe.2013.09.008
- Yang, S., Ong, S.K., Nee, A.Y.C., 2013. Design for Remanufacturing - A Fuzzy-QFD Approach, in: Nee, Andrew Y. C., Song, B., Ong, S.-K. (Eds.), *Re-Engineering Manufacturing for Sustainability*. Springer Singapore, pp. 655–661. doi:10.1007/978-981-4451-48-2_107
- Yang, S.S., Ong, S.K., Nee, A.Y.C., 2016. A Decision Support Tool for Product Design for Remanufacturing. *Procedia CIRP*, 13th Global Conference on Sustainable Manufacturing – Decoupling Growth from Resource Use 40, 144–149. doi:10.1016/j.procir.2016.01.085
- Yannou, B., Wang, J., Yvars, P.-A., 2010. Computation of the Usage Contexts Coverage of a Jigsaw With CSP Techniques 369–378. doi:10.1115/DETC2010-28677
- Yazdanbakhsh, A., Thwaites, B., Park, J., Esmailzadeh, H., 2014. *Methodical Approximate Hardware Design and Reuse (Technical Report)*. Georgia Institute of Technology.
- Yvars, P.-A., 2009. A CSP approach for the network of product lifecycle constraints consistency in a collaborative design context. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 22, 961–970.
- Zhang, Y., 1999. Green QFD-II: A life cycle approach for environmentally conscious manufacturing by integrating LCA and LCC into QFD matrices. *International Journal of Production Research* 37, 1075–1091. doi:10.1080/002075499191418
- Zvacek, S.M., 1991. Effective affective design. *TECHTRENDS TECH TRENDS* 36, 40. doi:10.1007/BF02761286

Chapitre 4. Proposition d'une méthode pour l'identification et la quantification des dérives d'usage environnementales

Ce chapitre fait l'objet d'une publication dans la revue *Journal of Cleaner Production*. Il est ici retranscrit tel que proposé à la revue : en anglais.

Abstract

Usage ecodriffs, which refer to non-optimal use of a product by the users, create additional environmental impact generators: energy overconsumption (real-time impacts) and abnormal wear and tear of parts of the product (delayed impacts). The goal of our study was to develop a method for identifying and quantifying UEDs of products that have a high environmental impact use phase. In this paper, we studied the case of different usages of a vacuum cleaner and their environmental consequences. We first conducted a survey to gather information on how people use the product. Then, we conducted experimentations to measure the consequences of the usages. We also explored how the testers responded to feedback inviting them to adopt a more sustainable behaviour. Results show that most of the users do not use the product optimally and cause additional environmental impact. Several usage ecodriffs were identified, causing both abnormal energy overconsumption and wear and tear of the product. The calculations show that Delayed Environmental Impacts, because their consequence is the early replacement of the whole product, are of much greater importance than Real-time Environmental Impacts. *Keywords:* Usage EcoDrift; Non-optimal usages; Sustainable behaviour; Use Phase Model; Ecodesign; Users Segmentation.

Introduction

The use phase of products is the source of a great share of environmental impacts at a global scale (Ardente and Mathieux, 2014). As a consequence, in most developed countries, the majority of products placed on the market has to respect stricter and stricter norms regarding environmental performance when used (see Europe 2020 targets on climate change and energy). The focus on the environmental importance of the use phase of products is quite recent among the design community (Nissen, 1995). It has been a growing concern for the relevance of ecodesign projects where indicators regarding the efficiency of the use phase were needed (Cerdan et al., 2009). Products as well as services have been subject to these changes in the ways of designing them (Maxwell and van der Vorst, 2003). These changes come along with the realization that even if a product has a very low impact manufacturing phase, its ecofriendly nature can be removed depending on its use phase's efficiency (Hauschild et al., 2004). Before that, the environmental impact of products has traditionally been understood as derived mainly from the life-cycle phases related to material transformation (McLeninghan, 1990). The use phase concern later appeared in ecodesign strategies as a criteria among others inside ecodesign checklists (Vezzoli and Sciama, 2006; Waage, 2007). Such strategies now take into account the whole of the life cycle of products (Herrmann et al., 2005, 2007). Through the years, the use phase has been more and more considered as a key issue of ecodesign problems. Famous cases

such as the shower faucet and the light bulb have been flagpoles for the recognition of the use phase as a crucial step of the life cycle. Many more cases can be found in the literature and have participated to the evolution of ecodesign strategies for a better use phase efficiency. The more recent user-centered design strategies have focused on two ways of bettering the environmental performance of products: first by influencing the product architecture using customer and environmental requirements, second by passing information to the users through feedback strategies regarding the best usage practices available (Lilley, 2009). On the product side for example, vacuum cleaners (that are the concern of our case study) are now subject to ecodesign requirements that set a minimum of 500 working hours for the motors and hoses. On the user side, to better the environmental performances, products are ecodesigned to be optimally used following prescribed usage patterns (Brezet and Hemel, 1997; Vezzoli and Manzini, 2008). However, there is no guarantee that users will do so. They might find their own ways to use the products and risk deteriorating the environmental performances (Tang and Bhamra, 2008). These non-optimal usages generate environmental impacts: first by causing unnecessary electrical overconsumption (Lilley, 2009; Tukker and Tischner, 2006), second by causing abnormal wear and tear of the product (and so forth the need of replacing it early) (Barré et al. 2013). If people were to use products in the best environmentally-friendly way, the impacts of the use phase would be smaller. Hence, researchers and designers need to concentrate on the non-optimal usages of products and find ways to counter them. They have to come to a better understanding of how people use products by studying their usage patterns. Then, by investigating what are the causes of these usages, they should be able to find the corresponding design solutions leading to better environmental performance. Numerous studies show that environmental performance can be bettered by affecting the way people use their products (McMahon and Bhamra, 2012; Tukker and Tischner., 2006). Usages of products are also directly linked to how the products are designed (Norman, 1988). These problems are the origin of the Design for Sustainable Behaviour field of research (Pettersen and Boks, 2009) which has been fed by renowned authors such as Bhamra, Lilley and many others. They have identified many strategies to affect user's behaviour through product design (Lilley, 2009; Lockton, 2013). These strategies have been applied by many later authors such as Desmedt et al. (2009) and Tang and Bhamra (2008) among others. In this study, we call product usage which deviates from the best environmental practices available "usage ecodrift" (UED). UEDs do not have yet a common shared definition among the scientific community. Given their importance on the environmental performance of products use phase, it appears necessary to clarify this concept. Although the UED concept has already been studied in the scientific community under other names, studies have mainly focused on eco-driving learning (Jamson et al., 2015; Rolim et al., 2014), on household practices related to energy consumption (Santin, 2011) and on household practices related to water heating (Santin et al., 2009). The problem was also developed in studies focused on intervention strategies aiming at reducing household energy consumption (Gulbinas and Taylor, 2014; Jain et al., 2012, 2013).

The goal of this paper is to develop a method for identifying and quantifying UEDs of products that have a high environmental impact use phase. We insist on the fact that delayed impacts (caused by wear and tear) have to be taken into account alongside with real-time impacts (energies and materials overconsumptions). By modeling the environmental impacts generated by these two sources, it is possible to calculate the environmental performance of the use phase for several different usage patterns (different combinations of UEDs). This allows us enlightening and prioritizing the design hotspots that must be corrected. By doing so, we aim to demonstrate that UEDs can be modeled to be taken into account during the design stage. There, they can be countered by choosing pertinent technological solutions.

To evaluate the pertinence of the UED concept, we chose the vacuum cleaner case study. We studied its usage by observing a panel of users and conducted several environmental evaluations of the product itself and of different usage scenarios. The results of the evaluations allowed us to conclude on the importance of UEDs for the use phase of the product.

In section 2, the UED problem is developed. We show that UEDs are multiple and cause more or less impacts. They depend on usages that can be grouped creating user segments. In section 3 we detail the research method in five points: (i) the reference usage definition, (ii) user segmentation, (iii) UED identification and experimentations, (iv) establishing UED models and (v) the environmental assessment of the use phase. Section 4 gathers the results obtained during the field and laboratory experimentations conducted for the study. Finally the results are discussed and future research problems are suggested.

The behaviour-centered design challenge

The concept of UED refers to two types of environmental impacts. The first type is “real-time impacts”.

In this case it is easy to make the link between the UED and the impact. For example electrical overconsumption is often caused by an obvious specific behaviour of the user. The second type refers to impacts caused by abnormal wear and tear (due to the user’s behaviour) of parts of the product. Because the problem is likely to be invisible to users until the concerned part or component fails, they will not easily understand the relation between their behaviour and the environmental impact. This gap between UED occurrence and awareness/consequence is the reason we call these “delayed impacts”.

Taking users behaviors into account during the design process is not easily done. For a given product, the diversity of users induces a diversity of usages and thus, a diversity of UEDs. This diversity is due to several factors such as need, culture, consent, etc. (Pierce et al., 2010). The context of use also has to be considered as it may influence user behaviour (Maguire, 2001).

Hence, designers are dealing with a triple UED-user segment-use context that, once uncovered, should allow them a global point of view of the use phase (Bhamra, 2011). In this paper, the work focuses on the two first points: UED and user segment.

The UED concept

Our definition of the UED concept is based on a previous research conducted by Serna-Mansoux et al. (2014b). The authors studied “variations of a sequence of tasks inside a usage scenario that causes additional environmental impacts”. Here, the concept of UED encompasses the variations Serna-Mansoux et al. (2014b) studied. It not only takes into account real-time impacts (due to overconsumptions) but also delayed impacts (due to abnormal wear and tear) (Barré et al. 2013). The following definition is proposed:

“For the usage of a product with a given functional unit, a UED is defined as a usage practice which, in comparison to a reference usage, causes: (i) an increase in energy consumption and/or (ii) an increase in materials consumption and/or (iii) abnormal wear and tear of the product (and so the need to replace it earlier), thus generating additional environmental impacts”.

This definition underlines the fact that diverse behaviors can be associated with the diversity of users (Guerra Santin et al., 2009). Hence, instead of considering only an “average user” and an “average usage” (Guerra Santin, 2011), the concept requires to study a wider panel of usages.

Considering users and usages

A first step of the problem concerns the way people learn how to use products. Later on, it is not given that the usage pattern will stay the same throughout the whole use phase. Usage patterns are likely to be influenced both by internal factors (ecological engagement, free time, health, culture, etc.) and external factors (energy cost, air quality, etc.) (Sardianou, 2008).

If we simplify the problem with the hypothesis that the usage, once learned, stays the same throughout the whole use phase (Pierce et al., 2008), the first question is “how do people learn how to use products?” Nowadays, technology changes fast and people are accustomed to acquiring and trying new products. In the case of mobile phones, the user manual is barely read. Users prefer to discover the interface and the functionalities of their phone intuitively (Britton et al., 2013). Knowing that, how can designers be sure that users will gravitate towards eco-friendly usage? This will depend on the internal and external factors listed above, but also on the knowledge of the device’s functionalities and their effects in terms of environmental impacts (Gulbinas and Taylor, 2014). Scientific studies have shown up four constraints likely to lead to UEDs.

- *Habit*: Pierce et al. (2010) demonstrated that most actions in everyday life are ruled by habit. These actions depend on unconscious mechanisms whereas conscious action is needed to

change one's behaviour. Furthermore, habits can be strong enough to cancel out any incentive aiming to change the behaviour.

- *Beliefs*: many people do not know the environmental consequences of their daily actions (Bedford et al., 2011; Fischer and Newell, 2010; Lillemo, 2014).
- *Comfort*: Perrin and Barton (2001) show that sustainable behaviors are often rejected because they induce additional effort for the user.
- *Time*: just as for comfort, a new behaviour may be rejected if it is seen as too time consuming (Tonglet et al., 2004).

User behavior is influenced by these four constraints simultaneously but some might be stronger than others. Grouping people according to their predominant behavioral constraints (and UEDs) is a way to segment users. Segment-specific technological solutions may then be developed to guide users towards a more eco-friendly behavior (Buchanan et al., 2014).

User awareness and design solutions

A product fulfils various different needs for various different users. Cor and Zwolinski (2014) state that taking this diversity into account is essential for establishing an efficient eco-design strategy. Designers should use this diversity to design the technological solutions for the product. In the same time, the way users will interact with these technologies has to be thought through.

If real usage differs notably from the ideal usage conceived by the designer, the environmental impacts generated during the use phase may increase. To prevent this, the product itself can be a way to encourage a behavioral change since it is an interface between user and usage (Cor et al., 2014). In the literature are found several “product to user” eco-usage mechanisms with different levels of enforcement (Froehlich et al., 2010; Pierce et al, 2008; Wever et al., 2008). They are usually labelled as “eco-feedback” (which is only informative), “behaviour steering” (which provides incentives and “forced functionality” (which is highly enforced).

Out of the four constraints listed in part 2.2 of this paper, we hold that *belief* is the most important. Indeed, a user who does not understand the relation between his actions and their environmental impacts may be more difficult to guide towards more sustainable behaviour (Lilley, 2009). A sustainable frame of mind change is the prerequisite for inducing sustainable behavioral change (Burgers et al., 2015; Davis et al., 2009; Perrels and Adriaan, 2012). According to the Theory of Planned Behavior (Ajzen, 1991), knowing that the user has control over his/her actions (if the product is well designed) and that social norms are clearly in favor of sustainable behavior (Barreto et al., 2014), then only the user's attitude will influence their behaviour.

Since users need to be made aware of the existence of the UEDs, informing them with eco-feedback seems to be an appropriate way of influencing their attitude (Serna-Mansoux et al., 2014a). However, a major eco-feedback drawback is the lack of certainty as to whether the user will get the information

or will react in the desired way (Buchanan et al., 2014). To improve the odds, designers must take into consideration the user's awareness process (Lidman et al., 2011; Serna-Mansoux et al., 2014b). When thinking of raising users' awareness, user-accepted product-solutions can be designed (Bhamra, 2011).

However, even when the behavioral change is accepted, it is necessary to ensure that the change is sustainable and will not fade over time (Scott et al., 2012; Serna-Mansoux et al., 2014a).

The UED methodology

To evaluate the impacts caused by UEDs, we set up a five step research protocol: (1) definition of usage of reference (UoR), (2) users segmentation, (3) identification of UEDs and experimentation, (4) establishing UED models and (5) environmental evaluation.

Step 1: Definition of the UoR

The UoR is defined as the optimal usage free of all UEDs. It is the usage that offers the best environmental performance. The UoR is useful in two ways. First, to have a value to compare the environmental performances of the observed practices with; second, to have a targetable goal that can be used to orientate users' behavior.

If the product is easy to use, simple tests, common sense and discussions with users and with the designers should be enough to define the UoR. Information may also have been published concerning the best usage practices (manufacturer recommendations, base-case scenarios from the norms, studies in the scientific literature, etc.). All this data is a precious help to have a broad view of the variety of usages of a product. Nevertheless, if finding the optimal usage of the product is not trivial and implies setting a greater number of parameters, techniques such as Design of Experiments (DoE) should be employed. DoE-like techniques should then allow determining the values of the usage parameters corresponding to the best environmental performance.

Step 2: User segments

A way to establish user segments is to explore directly the diversity of usages. To do so, a sufficient number of users and usage situations have to be observed. Data collection can be done in various ways. More important is the choice of the data collected and the ways of analyzing it. The data has to be pertinent to represent the diversity of usages. Then, using segmentation techniques allows establishing coherent users groups (for example probabilistic latent semantic user segmentation as described by Khobzi and Babak (2015) and Wu et al. (2009)).

Step 3: UEDs identification and experimentation

UEDs identification requires a broad and objective vision of the diversity of usages. Furthermore, when a UED is identified, it is crucial to know its level of occurrence among the population of users. A good way to have these broad and quantitative views of usages is to observe a large variety of users in a large variety of situations. Before observation, protocols have to be set up to define when a usage is

out of the UoR boundaries. We propose here a model of experimentation in order to identify the UEDs. The number of persons selected for the experimentation should be chosen depending on the diversity of users using the product. Our experimentation consists in two use sessions separated by a feedback intermission and concluded by a debriefing. The first session consists in letting the person use the product as usual, without giving them any advice. Their behavior and practices are observed during this session. The non-optimal practices that were observed during the first session and are absent of the UoR are considered as UEDs. Then, a feedback is given to the user directly to be sure that the information is heard. It is the occasion of informing the user about the optimal usage of the product. The second use session allows measuring the reaction to the feedback. Finally, the debriefing is useful in order to know whether the user understood the feedback they were given and how they interpreted it. In our method, measuring the UEDs parameters permits quantifying two of their negative consequences: overconsumption of energy and materials and decreased lifetime (LT) of the system.

Steps 4: Usage models

Before performing the environmental evaluation of the system, it is necessary to apply the results found during the experimentations to the whole of the product use phase. To do so, for each UED, we quantify the overconsumptions and define, using experience from the manufacturer and the users, the value of LT decrease. Each UED is characterized by the levels of its negative consequences: overconsumptions and LT decrease. Usage models corresponding to the observed behaviors of the people in the user segments are then created. They consist in different combinations of UEDs (each UED with a specific coefficient), defined to correspond to the observed usage patterns.

Step 5: environmental evaluation

Since the UEDs and usages models are defined by overconsumptions and LT decrease, it is easy to assess their environmental consequences by applying them to the model of the product in a Life Cycle Assessment (LCA) software. This allows quantifying the environmental consequences of the non-optimal usages and identifying the hot spots that have to be dealt with in priority.

Results

Case study

Our case study concerns the usage of a household cordless vacuum cleaner. The choice of the vacuum cleaner case study is motivated by several points. First, it is a widely distributed product; meaning that studying the user population can generate much data. It includes a battery, which is a component known for possibly being critically affected by non-optimal usage. It requires several user-product interactions to optimally function. The vacuum includes a dust canister (bagless system) and a dust filter. The control is a single three position slider button that is moved by the user's thumb when grabbing the handle. The three positions are (1) Stop, (2) Run (low power) and (3) Run (max power). The battery LT is 500 cycles.

We consider a functional unit defined using European norms as follows: “Run 500 vacuuming cycles on a 70 m² surface made of 70% hard floor and 30% soft floor”. The vacuuming cycle is defined as a vacuuming session followed by a complete charge of the battery.

Usage of Reference

The wireless vacuum cleaner is a fairly easy product to use. As a consequence, the optimal usage can easily be defined using common sense and conducting some tests. Here, the UoR has been defined by the research team after several tests, discussions and using some of the information provided by the manufacturer in the user’s manual. The UoR has to guarantee the product to have a service life at least as long as the manufacturer’s claim (here 500 cycles). The UoR elaborated is summed up and explained in the four following actions:

- *Use low power vacuum on hard floors and max power on soft floors.* Our tests showed that in a great majority of cases, low power was enough to vacuum hard floors and max power was necessary to vacuum soft floors with a satisfying result. The results of the vacuuming were assessed visually and by weighting the dust collected during the test (at least 95 % of the dust had to be vacuumed with two strokes).
- *Empty the canister once the marked level is reached.* Even if negative effects do not appear right after the marked level is reached, we chose to keep this level as our reference as it is obvious for the users.
- *Clean the dust filter after 2 running hours.* The cleanliness of the dust filter being difficult to qualify with only a visual control, we chose to keep the value given by the manufacturer. This value was also confirmed by our tests.
- *Unplug the battery charger when the charge is complete.* We measured the electrical consumption of the charger when plugged whereas the battery is full. We observed that a residual consumption exists and, as a consequence, recommended to unplug the charger when the battery is full.

The UoR was verified to fulfill the functional unit defined previously. As a consequence, with the hypothesis of complete use efficiency (optimal stroke speed to pick the dust up), the UoR can be considered as the most environmentally efficient usage considering the given functional unit.

User segments

To identify user segments we conducted a survey among a population of users. We designed a questionnaire with 25 questions to characterize the respondent’s usage practices. The questionnaire also allowed us to determine participants’ environmental awareness. When designing the questionnaire, four user segments were foreseen: “Hygiene”, “Comfort”, “High-Tech” and “Eco-sensitive” (see description in the list below). The segmentation was done as follows: each question of the questionnaire was attributed with four scores (one for each segment). Depending on the answer of the respondent, points were added to the corresponding segment scores. In the end, the

respondent was associated with the segment for which the score was the highest. The survey provided us with 350 completed questionnaires. The analysis of the results showed a segmentation of the population inside three segments (as the High-tech segment gathered less than 1 % of the population, we chose to remove it from the study):

- C1. Hygiene (40%):** They are not interested by how much electricity the vacuum cleaner needs. It is an everyday tool that must be efficient. People in this group are efficient and well organized for doing chores. Some know about the environmental consequences of their actions but they do not consider this as a priority.
- C2. Comfort (51%):** Their priority is their well-being. Chores need to be done, the quicker the better. They favor easy-usage efficient products. Their choice tends towards silent and automatic products.
- C3. Eco-sensitive (9%):** They are concerned about the consequences of their everyday actions. They often seek advice to improve their behaviour. Their home does not need to be perfectly clean if this means consuming a lot of electricity.

UED identification and experimentation

We set up an experimentation to identify the UEDs and quantify their consequences. During a first session, we observed a panel of twelve persons (see table 1) while vacuuming “as usual” a 10 m² room. The persons were chosen among the students and staff of the University of Toulon, France. The selection was made in accordance to the distribution of the user segments inside the population as seen in the previous section. The experimentation was monitored so that users can be observed without being disturbed by the presence of a member of the research team. Usage practices that deviated from the usage of reference were marked and, if relevant enough, labelled as UEDs.

Table 1

Characteristics of the participants with averages and, in parentheses, standard deviations

Group 1	5 women and 1 man 3 from C1, 2 from C2, 1 from C3 Average age: 46,5 years old (7,3) Average dwelling surface: 72 m ² (27,1) Average number of persons in the household: 1,8 (0,8) Average vacuuming time (hours per week): 1,8 (1,7)
Group 2	5 women and 1 man 2 from C1, 3 from C2, 1 from C3 Average age: 45,7 years old (9,6) Average dwelling surface: 83 m ² (29,4) Average number of persons in the household: 3 (1,9) Average vacuuming time (hours per week): 2,3 (2,9)
Altogether	10 women and 2 men 5 from C1, 5 from C2, 2 from C3 Average age: 46,1 years old (8,1) Average dwelling surface: 77,5 m ² (27,7) Average number of persons in the household: 2,4 (1,5)

	Average vacuuming time (hours per week): 2 (2,3)
--	--

Observation of users and comparison with the defined UoR led us to identify 5 UEDs:

- D1. Charging time management (battery left plugged in even when charged)
- D2. Dust filter cleanness (vacuuming with an obstructed filter)
- D3. Canister dust level (vacuuming even if the canister is already full)
- D4. Vacuum power management (always vacuuming using max power)
- D5. Preparing the room before vacuuming (wasting time moving furniture when vacuuming)

Not all users contribute towards these UEDs in the same proportions. The experimentation and the survey allowed us to identify UED tendencies inside the user segments. Proportions were established using observations as well as the answers to the questionnaire. These proportions are approximated in the following table (meaning that 50% of users from C1 is doing D1, 100% is doing D2, etc).

Table 2

UEDs distribution depending on user segment expressed in percentages of persons doing to the UED

	C1	C2	C3
D1	50	100	0
D2	100	100	50
D3	50	70	50
D4	50	70	50
D5	50	100	0

After the first vacuuming session, users were given feedback with information such as:

- power consumption and its annual equivalence in euros and CO₂;
- the possible gains if adopting a more sustainable behaviour; and usage advice such as:
- prepare the room before vacuuming to be quicker;
- use the different vacuum powers depending on the type of floor.

A positive evolution was observed after feedback for the three user segments. The following table lists the variations of the measured parameters.

Table 3

User performance after feedback taking account of segments

	C1		C2		C3	
	Before	After	Before	After	Before	After
Vacuuming time (minutes)	4.48	4.42	7.72	6.11	6.93	6.11

Total time (minutes)	4.64	4.55	7.93	7.04	7.45	6.57
Electricity consumption (Wh)	4.01	3.86	6.17	4.82	5.12	3.51
Time at Max. Power (%)	89	85	85	82	97	44
Number of power switches	0.60	1.46	0.15	0.17	0.27	0.56
Number of stops	0.40	0.40	1.25	3.75	0.33	2.00
Room preparation (1 to 5 bad to good evaluation)	1.80	3.00	2.00	4.00	1.66	3.00

Results show that for each segment the vacuuming time was shorter, the power consumption lower, there was less use of max power, there was more power switching, there were more stops and the room preparation was better. This experiment shows that it is possible to better the usage performances if the right advices are given to the users. However, it does not give information about the correct way of transmitting the information. Moreover, this experiment only shows the immediate effect of the feedback. Serna et al. (2014) showed that these effects may decrease over time if the feedback is not renewed periodically.

UED models and environmental evaluations

UED models

After the experimentation, each one of the UEDs was reproduced in the laboratory in order to measure and calculate their environmental consequences caused by energy overconsumption and/or abnormal wear and tear.

- D1. We measure the electrical power used when the charger is plugged in even if the battery is fully charged. We consider that the charger stays plugged in 24/7 except when the vacuum cleaner is running.
- D2. We simulate filter obstruction by covering the filter with a piece of fabric to slow the airflow; we then observe the consequences on the electric motor and the battery.
- D3. The same observations are made after filling the canister completely
- D4. We measure electricity consumption at low power and max power
- D5. We consider that not preparing the room before vacuuming results in a 10% increase of running time.

The results of the measurements and calculations are listed in the following table. The electrical overconsumption is the difference between the reference usage electrical consumption and the value measured when reproducing the UED. The value is given for 500 cycles (vacuuming session and complete charge of the battery). The LT decrease is estimated using after-sales data gathered by the manufacturer and discussion with their engineers and designers.

Table 4
UED consequences in terms of electricity overconsumption and LT decrease of product parts

UED	Consequences	Electricity consumption	LT decrease
None	None	14.3 kWh	Battery LT of 500 cycles
D1 : charge management	Charger plugged in 24/7	+3.3 kWh	Battery LT down to 360 cycles
D2 : filter cleanness	Less vacuum power, hard on the motor, more running time	+1.3 kWh	Motor LT decrease of 10 %
D3 : full canister	Less vacuum power, more running time	+2.6 kWh	Measures didn't show impacts neither on the battery nor on the motor
D4 : power management	Accelerated battery aging	+3.2 kWh	Battery LT down to 400 cycles
D5 : room preparation	More running time	+3.1 kWh	No loss as the number of cycles stays the same

LCA methodology

The environmental evaluations carried out for this study were conducted using the SimaPro v8.0.4.30 software and the EcolInvent v3.1 database. The LCAs were performed accordingly to the ISO 14040 and ISO 14044 norms (Guinée et al., 2010). The goal of our study is to assess the environmental impact of the different UEDs and different combinations of UEDs identified. The functional unit is defined using European norms: "Run 500 vacuuming cycles on a 70 m² surface made of 70% hard floor and 30% soft floor". We do not take into account in our LCAs neither the phases of transportation nor the end of life of the product. We consider that there is no maintenance. The life cycle inventory of the vacuum cleaner was carried out in laboratory. A genuine vacuum cleaner was provided for the study. It was completely dismantled and each component was characterized and weighted. The impacts of the electrical consumption during the use phase were considered using the French energetic mix. The data was compiled in SimaPro to perform the life cycle impact assessment. The life cycle impact assessment

was carried out using SimaPro with the IMPACT 2002+ method (Jolliet et al., 2003). The overall scheme of the IMPACT 2002+ framework is visible in figure 25.

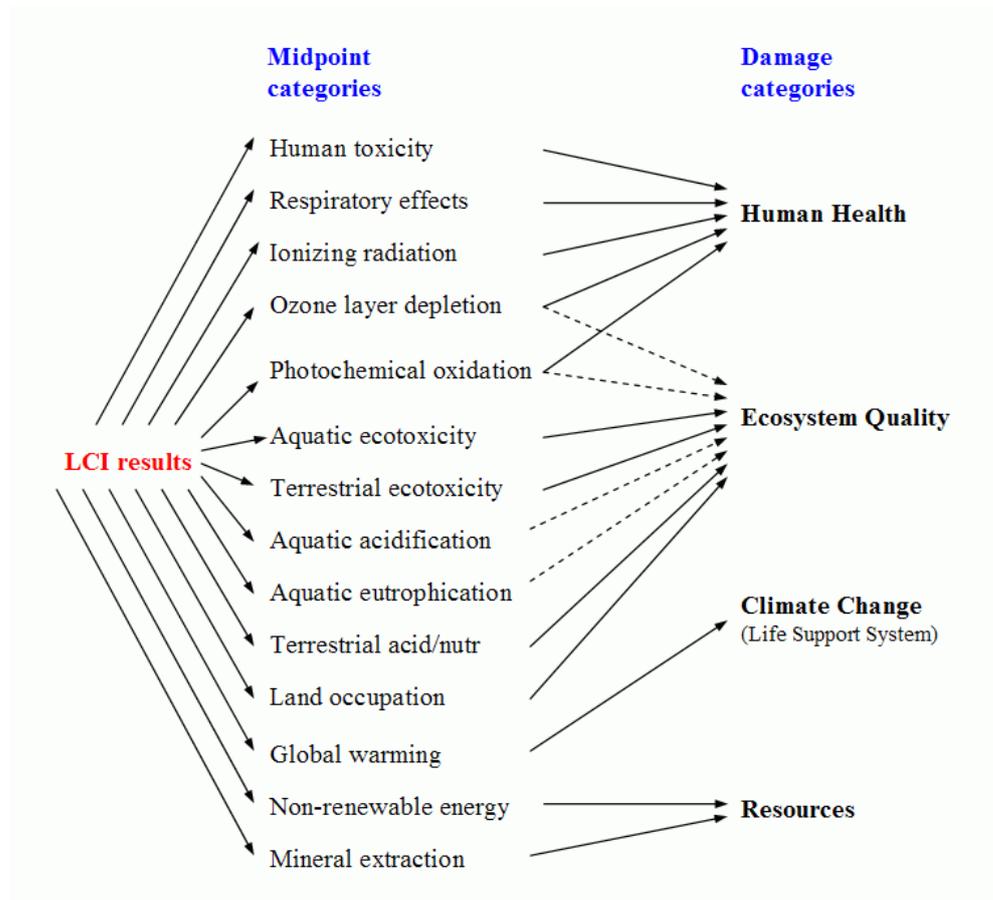


Fig. 25. Overall scheme of the IMPACT 2002+ framework, based on Jolliet et al. (2003)

Interpretation of the LCAs conducted for our study is given in the “Discussion” section of this paper.

1st case: environmental impacts of UEDs alone

UED consequences, in terms of overconsumption and LT decrease, are translated into mathematical equations in order to calculate environmental impacts. We consider that the LT decrease of a product part induces the same LT decrease for the whole product. This means that if the battery is dead after only 400 cycles the complete product has to be replaced, generating additional environmental impacts (since the functional unit considers 500 cycles). These equations are established from the results displayed in table 4 and are listed in the following table. To keep equations simple, we used a single variable EI to represent the environmental impacts final score. The coefficients before EI_{vc} are the “number of vacuum cleaners” needed to complete the 500 cycles considering that the UEDs can cause a decreased number of cycles (for example, if the lifetime is reduced to 400 cycles, 1.25 vacuum cleaners, each with a LT of 400 cycles, will be needed to complete the 500 cycles). The coefficients before EI_{AEG} represent the increase of electrical consumption measured between the reference usage and the UEDs.

Table 5
Mathematical expressions of UEDs environmental impacts

	Overconsumption	LT	Environmental impact (EI)
No UED	14.3 kWh	-	$EI_{D0} = EI_{VC} + EI_{AEG}$
D1 : charge management	+3.3 kWh	360 cycles	$EI_{D1} = 1.39 \times EI_{VC} + 1.25 \times EI_{AEG}$
D2 : Filter cleanness	+1.3 kWh	Motor - 10 %	$EI_{D2} = 1.1 \times EI_{VC} + 1.1 \times EI_{AEG}$
D3 : Canister	+2.6 kWh	-	$EI_{D3} = EI_{VC} + 1.2 \times EI_{AEG}$
D4 : Power management	+3.2 kWh	400 cycles	$EI_{D4} = 1.25 \times EI_{VC} + 1.25 \times EI_{AEG}$
D5 : Preparation	3.1 kWh	-	$EI_{D5} = EI_{VC} + 1.25 \times EI_{AEG}$

EI_{VC} : the environmental impact of the vacuum cleaner manufacturing

EI_{AEG} : the environmental impact of the vacuum cleaner electrical consumption without UEDs according to the functional unit

EI_{Dx} : the environmental impact of UED n° x.

To calculate the environmental impacts of the vacuum cleaner, it was completely disassembled to obtain its bill of materials as shown in figure 36 below. Using the EcoInvent database, the LCA model of the vacuum cleaner was established according to the bill of materials.

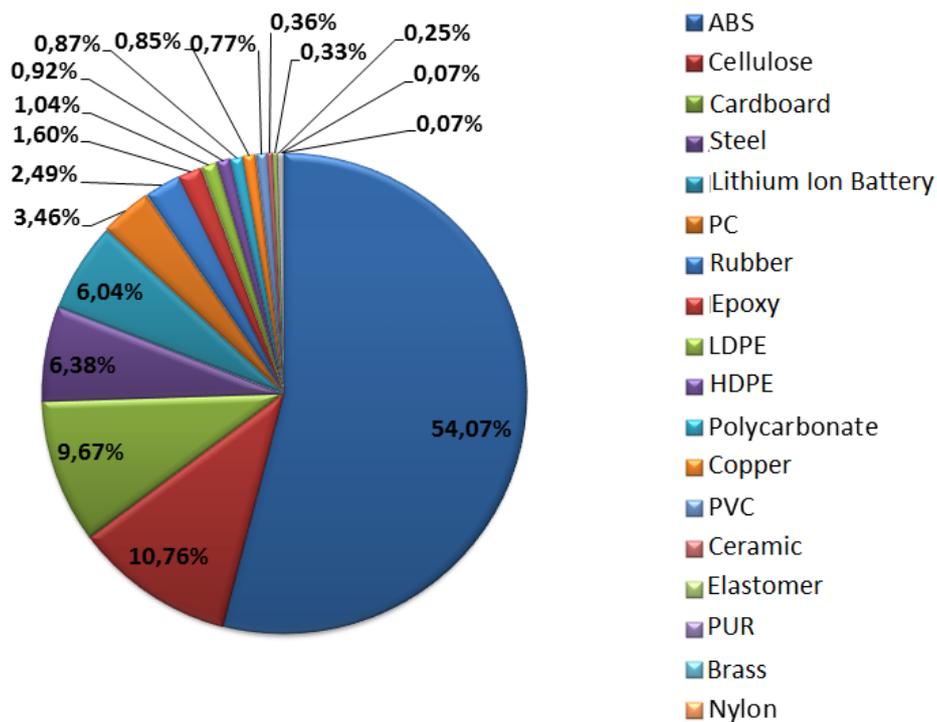


Fig. 26. Bill of materials of the vacuum cleaner

Using the results from table 4, we conducted environmental evaluations for each UED. The results are shown on figure 27 (electrical overconsumption alone, the value of the UoR being zero) and figure 28 (electrical overconsumption and early replacement of the product). On all the next figures are only visible the eight IMPACT2002+ midpoint impact categories with the highest scores. In figures 27 to 29, the numeric value written on the blue sections of each column stands for the value of the “Global Warming” impact expressed in kg CO₂-eq.

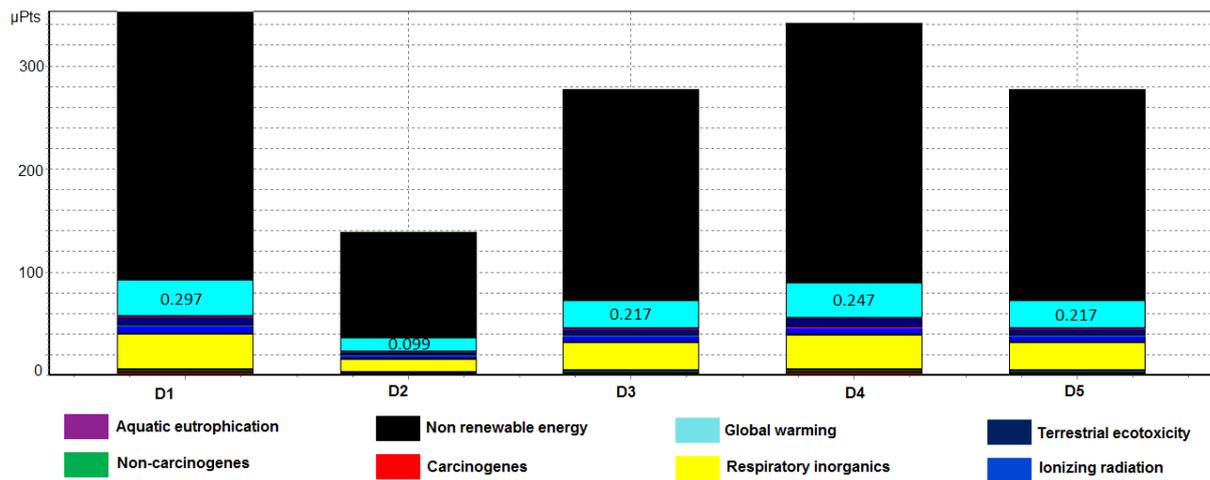


Fig. 27. Environmental impacts caused by electrical overconsumption of UEDs

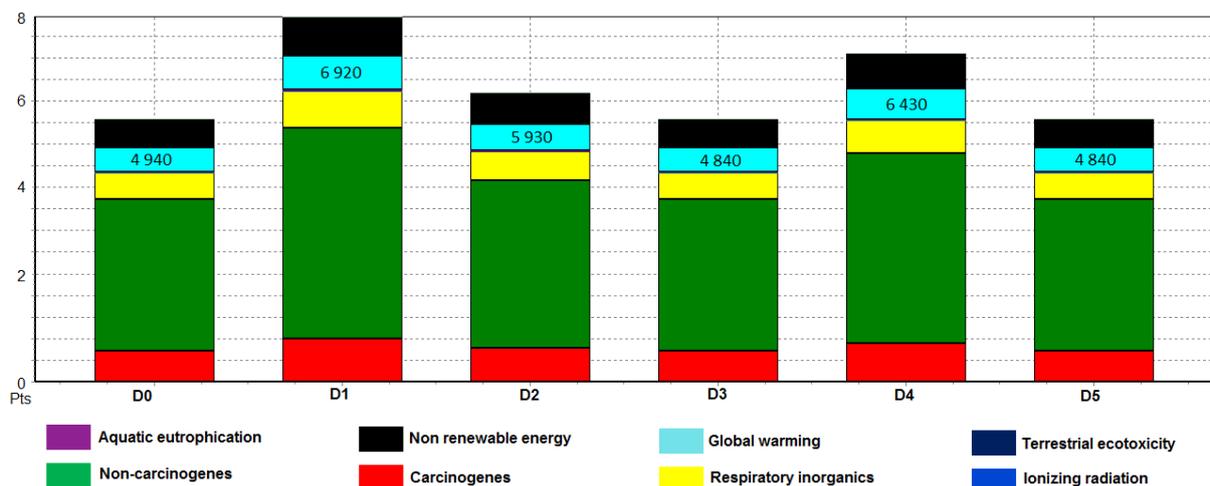


Fig. 28. Environmental impacts caused by UED overconsumption and early replacement of the product

The results show a clear correlation between environmental impact and product LT. Because of early product replacement, UEDs D1 and D4 have the highest impact scores (+2.3 and +1.6 Pt). Electrical overconsumptions alone (D3 and D5) do not generate a significant impact (from +140 to +350 µPt).

2nd case: Distribution of UEDs taking account of user segments

Taking into account UED distribution depending on user segments allows us to obtain results closer to, real usages. It shows that because their usage practices are different, user segments will not all have the same environmental performances. To model these different usage practices, a sum of UEDs weighted accordingly to the results of table 2 is attributed to each user segment. It must be noted that if the overconsumption impacts are simply summed up, it is not as simple for the lifetime decrease impacts. For the lifetime decrease we only take into account the UED that has the strongest impact. The equations modeling these usage practices are listed in the table 6 below.

Table 6

Sum of the environmental impacts caused by UEDs for each user segment

	D1	D2	D3	D4	D5	Sum
C1	50	100	0	50	100	$El_{C1} = 0.5 \times El_{D1} + El_{D2} + 0.5 \times El_{D3} + 0.5 \times El_{D4} + 0.5 El_{D5}$
C2	100	100	50	100	100	$El_{C2} = El_{D1} + El_{D2} + 0.7 \times El_{D3} + 0.7 \times El_{D4} + El_{D5}$
C3	50	70	50	50	70	$El_{C3} = 0.5 \times El_{D2} + 0.5 \times El_{D3} + 0.5 \times El_{D4}$

The results of the environmental evaluations of the usage practices of the three user segments are displayed in the figure 29 below.

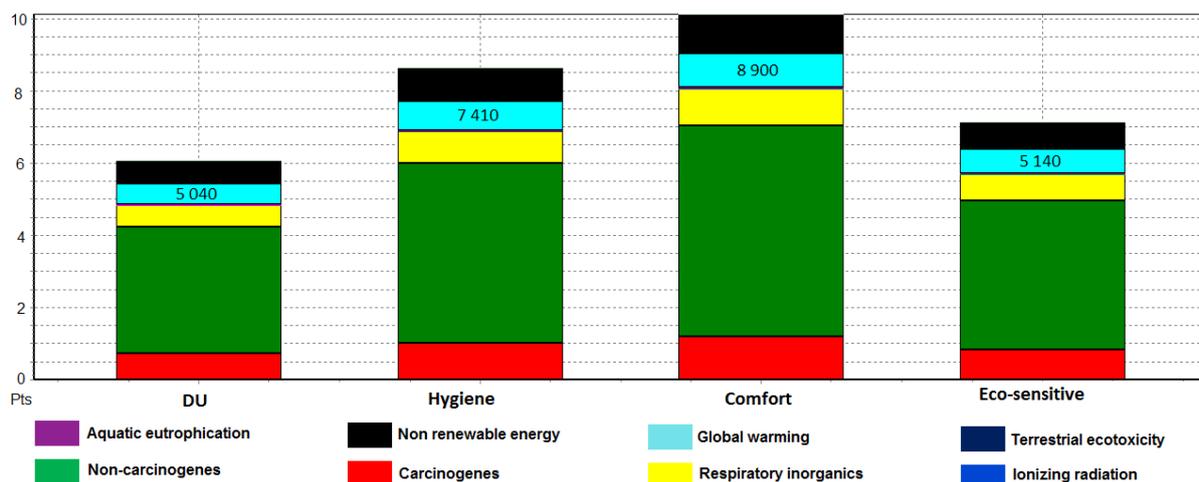


Fig. 29. Environmental impact of the usage practices of each user segment

Figure 29 shows that summing UEDs has heavy consequences. We can see that the score of segment 2 (C2 being the one with the most UEDs) is 64% (+4.1 Pt) higher than the ideal use score without UED (C0).

Design solutions

The results show that a product's usage may have heavy consequences in terms of environmental impacts. Most of these consequences can be foreseen and dealt with during the design process. To illustrate this idea, below we propose two solutions which would reduce UEDs in some measure. First, the UED "power management" revealed that users often stay at max power even when not needed. After observation, it appears that the slider button used to power the vacuum cleaner up is a potential cause of this UED. With the current slider, it is easy to push from STOP to MAX POWER bypassing the LOW POWER position. Some users did not even notice the middle position of the slider. For this reason some of them overuse the vacuum's max power, thus generating more environmental impact. This issue is easily solved by modifying the control button.

Second, a consequence of some UEDs is the LT decrease of parts of the product. Making these parts easily replaceable would avoid throwing away the product when only one part is worn out. Furthermore, it would allow upgrading of the replaced parts and increase the product's attractiveness. Nevertheless, not all the non-optimal usages can be corrected with simplistic design solutions. For example, the UED of power management is also a belief/habit problem (people often think that the low power position is not efficient) that may take a long time and complex incitation to be corrected permanently. Methods enabling designers to create these effective eco-usage awareness strategies are still being developed by the sustainable usage research community.

Discussion

The case study chosen in this paper was a wireless vacuum cleaner. This choice was motivated by the fact that many households possess a vacuum cleaner and people see it from many points of view. For some it is a pleasure to keep the house clean, for some it is a chore. Hence, we were certain to easily gather a lot of user feedback and to establish different user segments. The fact that the vacuum cleaner is cordless is also important as devices with electric batteries are known to possibly age quickly if not used correctly. The results would probably have been totally different if the case study had been a wired vacuum cleaner.

The usage of reference included the few usage advices found in the user manual of the vacuum cleaner. However, a large part of it was established arbitrarily after discussion and tests. By doing so, it is well possible to come up with a usage of reference which is not environmentally optimal. The usage of reference has to remain flexible so that if better usage patterns are encountered they can be included in it. The usage of reference has to be clear of UEDs. Otherwise it is possible to miss them and to come up with false results.

Three user segments were defined using the results of the survey. The definition of the segments highly depends on the survey itself and on its analysis. Depending on the questions asked to the people surveyed and how the answers are interpreted, the results could have been different. The number of people surveyed may also play an important role. The survey took place in France, nationwide, where

350 people were surveyed. Hence, our study gives pertinent results for similar populations only. The results might be different considering a population with a great cultural gap.

Five UEDs were identified after observing the vacuuming sessions of twelve participants. The participants were chosen so that each user segment was equally represented. It is clear that a higher number of participants would have been essential to certify the results. Unfortunately, the lack of adequate resources prevented us from extending the number of participants.

Feedback was given to the participants between their two vacuuming sessions. It was given in the form of usage advices written on a sheet of paper. The feedback was well transmitted and accepted as it was sure the users would read it and were in a good disposition to try and better their behaviour. However, this case is not close to a real life situation. Knowing how people at home would react to different types of feedback regarding daily actions would be important data to get results closer to reality.

During the experimentations, we identified a UED which is not related to the product: “not preparing the room before vacuuming”. Even if it has no direct link with the product, we consider it is a pertinent UED as it has a great influence on the vacuuming task. This UED shows that only focusing on the product and its functions may not be sufficient. It would probably not have been detected without *in situ* observations. Therefore, studying the real usages from the users is showed to be useful.

UEDs were reproduced in laboratory as close to reality as possible. The losses due to UEDs in terms of number of cycles for the battery and the motor are not easily calculated. The numbers used in our study are approximations established with help from the vacuum cleaner manufacturer. It was not possible to certify the numbers in laboratory as it would have been too time consuming to completely wear out several vacuum cleaners.

For the environmental evaluations we considered that if a UED caused a decreased number of cycles, another complete vacuum cleaner was needed to complete the 500 cycles. The environmental impact of the second vacuum cleaner was weighted accordingly to the remaining number of cycles to 500. The end of life of the products was not taken into account in the calculations.

Conclusion

Whereas most environmental use-phase studies only take into account real-time impacts caused by overconsumption of energy and materials, the delayed impacts also caused by UEDs can be of much greater importance. When causing abnormal wear and tear of product parts, UEDs' impacts can increase dramatically since, for many products, replacing the whole product is easier than replacing the worn part.

In this paper, a methodology to identify and quantify UEDs and their consequences was elaborated. It was then tested on the cordless vacuum cleaner case study. First, the reference usage of the product

was defined as the one with the best environmental performance. Second, a survey was conducted among the population of users to define user segments. Three were identified: hygiene, comfort and eco-sensitive.

The definition of the segments was crucial as it influences the rest of the method up to the design solutions. It must be assured that the user segments represent parts of the user population that will need different intervention strategies to better their usage practices. Third, experimentation was conducted to quantify the UEDs from people of each segment. It was shown that depending on the segment, users have specific usage tendencies that can be represented by a weighted combination of UEDs. Every user may have its own personal weighting. However, the point is that such diversity cannot be taken into account when elaborating intervention strategies through product design. Reducing this diversity by considering pertinent user segments which gather people with similar weightings seems to be a good compromise. It is a way for bettering the practices of a maximal number of users with a minimal number of different intervention strategies (theoretically one for each user segment). Fourth, these UEDs were analyzed in laboratory to measure and calculate their consequences in terms of energy overconsumption and LT decrease. It has to be done the closest possible to reality to obtain realistic measurements. Fifth, from these consequences, environmental impacts values were calculated throughout the LT of the product. The results showed that UEDs, when summed up, can cause a raise up to 64 % of the environmental impact. It includes overconsumptions of energy but it is most of all caused by LT deterioration and the environmental cost of replacing the product early. In order to increase products' LT, designers must anticipate UEDs and the wear and tear they generate. It was finally shown that some easily found technological solutions can prevent some of the non-optimal usages. Furthermore, advanced intervention strategies such as ecofeedback may be of great efficiency for more reticent to change user segments. An evolutionary feedback may also permit a better persistence of the usage change through time. A difficulty may be to find a set of ecofeedback technologies working efficiently for the different user segments (which may each need a specific behavioral change strategy). However, as each intervention strategy may add environmental impacts to the product's account, it would be necessary to assess each one of them to determine their environmental profitability.

Contrary to the other life cycle phases of products which are often well-known, the use phase is defined by high uncertainties. Considering its importance, developing methods to help researchers and designers modelling it and assessing its impacts is crucial to design eco-friendly products. The use-phase model including UEDs described in this paper aims to be used in our future research, in a wider life cycle model for the ecodesign of products.

Acknowledgements

We thank the ANR (French national research agency) for its support through the ECOTECH program (n°11-ECOT-001).

References

- Ajzen, I., 1991. The theory of planned behavior. *Organizational behavior and human decision processes* 50, 179–211.
- Ardente, F., Mathieux, F., 2014. Environmental assessment of the durability of energy-using products: method and application. *Journal of Cleaner Production* 74, 62–73.
- Barré, A., Deguilhem, B., Grolleau, S., Gérard, M., Suard, F., Riu, D., 2013. A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications. *Journal of Power Sources* 241, 680–689.
- Barreto, M.L., Szóstek, A., Karapanos, E., Nunes, N.J., Pereira, L., Quintal, F., 2014. Understanding families' motivations for sustainable behaviors. *Computers in Human Behavior* 40, 6–15.
- Bedford, T., Collingwood, P., Darnton, A., Evans, D., Getersleben, B., Abrahamse, W., Jackson, T.D., 2011. Guilt: an effective motivator for pro-environmental behaviour change? RESOLVE Working Paper Series, 07-11.
- Bhamra, T., Lilley, D., Tang, T., 2011. Design for sustainable behaviour: using products to change consumer behaviour. *The Design Journal* 14, 427–445.
- Brezet, H., Hemel, V.C., 1997. ECODESIGN: A promising approach to sustainable production and consumption. ResearchGate.
- Britton, A., Setchi, R., Marsh, A., 2013. Intuitive interaction with multifunctional mobile interfaces. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences* 25, 187–196.
- Buchanan, K., Russo, R., Anderson, B., 2014. Feeding back about eco-feedback: How do consumers use and respond to energy monitors? *Energy Policy* 73, 138–146.
- Burgers, C., Eden, A., van Engelenburg, M.D., Buningh, S., 2015. How feedback boosts motivation and play in a brain-training game. *Computers in Human Behavior* 48, 94–103.
- Cerdan, C., Gazulla, C., Raugei, M., Martinez, E., Fullana-i-Palmer, P., 2009. Proposal for new quantitative eco-design indicators: a first case study. *Journal of Cleaner Production* 17, 1638–1643.
- Cor, E., Domingo, L., Brissaud, D., Zwolinski, P., 2014. A protocol to perform usage oriented ecodesign. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 63, 169–172.
- Cor, E., Zwolinski, P., 2014. A procedure to define the best design intervention strategy on a product for a sustainable behavior of the user. *Procedia CIRP* 15, 425–430.
- Davis, G., O'callaghan, F., Knox, K., 2009. Sustainable attitudes and behaviours amongst a sample of non-academic staff: A case study from an Information Services Department, Griffith University, Brisbane. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 10, 136–151.

Fischer, C., Newell, R.G., 2008. Environmental and technology policies for climate mitigation. *Journal of environmental economics and management* 55, 142–162.

Froehlich, J., Findlater, L., Landay, J., 2010. The design of eco-feedback technology, in: *Proceedings of the SIGCHI Conference on*

Human Factors in Computing Systems. ACM, pp. 1999–2008.

Guinee, J.B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., Rydberg, T., 2010. Life cycle assessment: past, present, and future†. *Environmental science & technology* 45, 90–96.

Gulbinas, R., Taylor, J.E., 2014. Effects of real-time eco-feedback and organizational network dynamics on energy efficient behavior in commercial buildings. *Energy and buildings* 84, 493–500.

Hauschild, M., Jeswiet, J., Alting, L., 2005. From life cycle assessment to sustainable production: status and perspectives. *CIRP*

Annals-Manufacturing Technology 54, 1–21.

Herrmann, C., Bergmann, L., Thiede, S., Halubek, P., 2007. Total Life Cycle Management-An Integrated Approach Towards

Sustainability, in: *3rd International Conference on Life Cycle Management, Zurich*.

Herrmann, C., Mansour, M., Mateika, M., 2005. Strategic and operational life cycle management-model, methods and activities, in:

Proceedings of the 12th International CIRP Seminar on LCE. 3–5.

Jain, R.K., Taylor, J.E., Culligan, P.J., 2013. Investigating the impact eco-feedback information representation has on building occupant energy consumption behavior and savings. *Energy and Buildings* 64, 408–414.

Jain, R.K., Taylor, J.E., Peschiera, G., 2012. Assessing eco-feedback interface usage and design to drive energy efficiency in buildings. *Energy and buildings* 48, 8–17.

Jamson, S.L., Hibberd, D.L., Jamson, A.H., 2015. Drivers' ability to learn eco-driving skills; effects on fuel efficient and safe driving behaviour. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 58, 657–668.

Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., Rosenbaum, R., 2003. IMPACT 2002+: a new life cycle impact assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 8, 324–330.

Khobzi, H., Teimourpour, B., 2015. LCP segmentation: A framework for evaluation of user engagement in online social networks.

Computers in Human Behavior 50, 101–107.

Lidman, K., Renström, S., Karlsson, M., 2011. The Green User. Design for Sustainable Behaviour., in: *Proceedings from the IASDR*

Conference 2011, Diversity and Unity, Oct 31-Nov 1, 2011, Delft, S. 1-12.

- Lillemo, S.C., 2014. Measuring the effect of procrastination and environmental awareness on households' energy-saving behaviours: An empirical approach. *Energy Policy* 66, 249–256.
- Lilley, D., 2009. Design for sustainable behaviour: strategies and perceptions. *Design Studies* 30, 704–720.
- Maguire, M., 2001. Context of use within usability activities. *International Journal of Human-Computer Studies* 55, 453–483.
- Maxwell, D., Van der Vorst, R., 2003. Developing sustainable products and services. *Journal of Cleaner Production* 11, 883–895.
- McLeninghan, V., 1990. *Sustainable Manufacturing: Saving Jobs, Saving the Environment*. Center for Neighborhood Technology.
- McMahon, M., Bhamra, T., 2012. “Design Beyond Borders”: international collaborative projects as a mechanism to integrate social sustainability into student design practice. *Journal of Cleaner Production* 23, 86–95.
- Nissen, U., 1995. A methodology for the development of cleaner products: The ideal-eco-product approach. *Journal of Cleaner Production* 3, 83–87.
- Perrels, A., 2008. Wavering between radical and realistic sustainable consumption policies: in search for the best feasible trajectories. *Journal of Cleaner Production* 16, 1203–1217.
- Perrin, D., Barton, J., 2001. Issues associated with transforming household attitudes and opinions into materials recovery: a review of two kerbside recycling schemes. *Resources, Conservation and Recycling* 33, 61–74.
- Pierce, J., Odom, W., Blevins, E., 2008. Energy aware dwelling: a critical survey of interaction design for eco-visualizations, in: *Proceedings of the 20th Australasian Conference on Computer-Human Interaction: Designing for Habitus and Habitat*. ACM, pp. 1–8.
- Pierce, J., Schiano, D.J., Paulos, E., 2010. Home, habits, and energy: examining domestic interactions and energy consumption, in: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, pp. 1985–1994.
- Rolim, C., Baptista, P., Duarte, G., Farias, T., Shiftan, Y., 2014. Quantification of the impacts of eco-driving training and real-time feedback on urban buses driver's behaviour. *Transportation Research Procedia* 3, 70–79.
- Santin, O.G., 2011. Behavioural patterns and user profiles related to energy consumption for heating. *Energy and Buildings* 43, 2662–2672.
- Santin, O.G., Itard, L., Visscher, H., 2009. The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock. *Energy and buildings* 41, 1223–1232.

- Sardianou, E., 2008. Estimating space heating determinants: An analysis of Greek households. *Energy and Buildings* 40, 1084–1093.
- Scott, K., Bakker, C., Quist, J., 2012. Designing change by living change. *Design Studies* 33, 279–297.
- Serna-Mansoux, L., Chapotot, E., Millet, D., Minel, S., 2014a. Study of user behaviour after eco-use feedback: the Green-Use Learning Cycle (GULC) as a new strategy for product eco-design. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* 8, 43–54.
- Serna-Mansoux, L., Popoff, A., Millet, D., 2014b. A Simplified Model to Include Dynamic Product-User Interaction in the Eco-Design Process. *Journal of Industrial Ecology* 18, 529–544.
- Tang, T., Bhamra, T., others, 2008. Changing energy consumption behaviour through sustainable product design, in: *DS 48: Proceedings DESIGN 2008, the 10th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia*.
- Tonglet, M., Phillips, P.S., Bates, M.P., 2004. Determining the drivers for householder pro-environmental behaviour: waste minimisation compared to recycling. *Resources, Conservation and Recycling* 42, 27–48.
- Tukker, A., Tischner, U., 2006. Product-services as a research field: past, present and future. Reflections from a decade of research. *Journal of cleaner production* 14, 1552–1556.
- Vezzoli, C., Sciama, D., 2006. Life Cycle Design: from general methods to product type specific guidelines and checklists: a method adopted to develop a set of guidelines/checklist handbook for the eco-efficient design of NECTA vending machines. *Journal of Cleaner Production* 14, 1319–1325.
- Vezzoli, C.A., Manzini, E., 2008. *Design for environmental sustainability*. Springer Science & Business Media.
- Waage, S.A., 2007. Re-considering product design: a practical “road-map” for integration of sustainability issues. *Journal of Cleaner production* 15, 638–649.
- Wever, R., Van Kuijk, J., Boks, C., 2008. User-centred design for sustainable behaviour. *International journal of sustainable engineering* 1, 9–20.
- Wu, X., Yan, J., Liu, N., Yan, S., Chen, Y., Chen, Z., 2009. Probabilistic latent semantic user segmentation for behavioral targeted advertising, in: *Proceedings of the Third International Workshop on Data Mining and Audience Intelligence for Advertising*. ACM, pp.10–17.

Chapitre 5. Proposition d'un modèle simplifié pour une prise en compte dynamique des relations produit-usages au cours du processus d'écoconception

Ce chapitre fait l'objet d'une co-publication dans la revue *Journal of Industrial Ecology*. Il est ici retranscrit tel que proposé à la revue : en anglais.

Abstract

For many modern products, the use phase is intensive and poses a serious environmental impact because of the energy consumed, as well as consumable resources. This could be resolved by optimizing the product environmental impact, and notably by improving the understanding of the users' relationships with it. In this work, we propose a model framework that can be used to include the sustainable use phase and its eco-driven strategies in the environmental impact analysis of a product via the LCA. We propose the recognition of the dynamical, changing nature of product-user interactions in time. An indicator designated "Mitigation Rate" of an eco-strategy is proposed to assess environmental impact of a product. This "Mitigation Rate" acknowledges the loss in performance of eco-feedback strategies through time, enabling a more pertinent consideration of eco-feedback evolution from the beginning. It presents a methodology to understand and build different alternate models, and a case study where 4 alternative models are constructed and compared.

Introduction: on product use and life-cycle assessment

As the use phase receives more attention in the analysis of environmental impact of products, the ecologically friendly product (eco-product) design needs new tools to include this dimension in its methodology. On the one hand, Life Cycle Analysis (LCA) has been the most widely spread tool to analyse product impact, even considering the difficulties related with its correct application. A thorough overview of its latest evolution can be found in Finnveden et al. (2009) and Hauschild et al. (2005). Nevertheless, the impact of the use of a product has not been quite considered to that degree of detailed calculation. We can find examples of this kind of eco-design advances in Cerdan et al. (2009), Maxwell and van der Vorst (2003), Michelini and Razzoli (2004), Nissen (1995), and Yang and Chen (2011), Kaebernick et al. (2003). As has been pointed out by Hauschild et al. (2004), if the product has been design to have low impact in manufacturing but consumes high levels of energy during use, the point of environmentally friendly design has been lost.

On the other hand, the user-centred design strategies have traditionally considered the adaptation of product architecture as well as the implementation of feedback strategies to induce a correct use of the product in environmental terms. As it will be seen in the next section, ecological approaches remain limited.

The environmental impact of products has traditionally been understood as derived mainly from the phases of life-cycle related to material transformation and transportation. Inclusion of the use phase

has normally been done as part of a greater checklist of criteria, with no particular highlight, such as in Vezzoli and Sciama (2006) and Waage (2007), Herrmann et al. (2005), Herrmann et al. (2007). It has increasingly been proven though, that the use-phase of products has an important role as well. Typical cases such as the shower faucet and the light bulb have been already spotted and undergone several adaptations to prevent water and energy over-consumption. Cases in other type of products can be found in Verbong et al. (2012) and Ornetzeder and Rohrer (2006).

Not only in terms of energy and resources consumption, but also in the production of by-products such as discarded packaging, or polluting materials. The central key to the understanding of the use phase importance lies in the Preprint submitted to Journal of Industrial Ecology November 27, 2012 recognition that the main function of a product is to relate human beings to their world. In viewing the product as an agent in service of a certain "user", it becomes pertinent to design environmentally friendly products from the use phase and outwards to the rest of the life cycle phases

In spite of this, the simple adoption of user-centred approach when eco-designing products is not as straight forward as it seems. Since the use phase of a product is when individuals relate to the product the most, all the complexity of a human being becomes a relevant issue to take into account. Using a product implies not only the functional aspects, but also the aesthetic and the symbolical. A product, when used, becomes not only the medium through which people achieve simple purposes (contain materials, transform food or drink, or enhance physical force, etc.), but also serves as an instrument of the human imagination. Several recent authors, such as Norman (2004), Krippendorff (2006) have reminded product designers this. Classical ones, such as Lobach (1976) had already established reference "basis.

Moreover, the different relationships users develop with the products they manipulate is not static, but changes in time, obeying to the dynamic nature of human behaviour, needs, habits, and skills, as works such like Vallette (2005) demonstrate.

Understanding the energy consumption of a product, for example, requires the understanding of the use phase and the particularities of the user-product interaction. Energy-saving features only work if people use the product as intended. Therefore, design strategies focusing on energy-efficient usage of products are likely to complement technological solutions, derived from engineering disciplines.

In specific terms, when addressing the environmental impact, the practical analysis of the use phase has become a challenge. In broader terms, the Life Cycle Assessment (LCA) method has been used to calculate impacts on the environment. It considers all the phases a product passes through to exist and then to be discarded. In Section 2 and 3 the general characteristics of the LCA are recalled.

Let it just be noted in this introduction that the traditional LCA considers the use phase as a fixed pattern that is not necessarily realistic. To illustrate this, we consider the example of car emissions.

These are measured following the New European Driving Cycle (NEDC) in conjunction with the Emission Directive 98/69/EC (Gruden (2003)). The measurement consists of a set of 4 short cycles aimed at simulating a City driving cycle, and another longer cycle aimed at simulating an Extra Urban Driving Cycle. The total time of test is 1180 seconds and around 11 kms. This is multiplied by the total time expected for the car to run. Yet in reality, nobody drives at the same speed and under the same climate conditions all the time, and thus the approximation calculated can be deceiving.

In products in which energy and/or resources consumption is an important feature, special attention must be made to understand the different scenarios of use, and the different ways a product can be understood when addressing environmental concerns. Use, as opposed to other phenomena, cannot be calculated by means of average values. It involves change in different dimensions. And in this work, we will address change in time for user-product interaction.

Our focus is the sustainable use. This is, the use of a product so that its impact on the environment can be minimized as much as possible. In order to achieve this, products usually integrate some kind of information exchange so that the user can learn to use the product in a way that will impact the less. In section 2 different ways to integrate this information exchange are revised. We then propose a model framework to explore these alternatives and guide decisions in eco-product design. The model framework is explained in Section 3, while Section 4 shows a case study to implement this model and prove its use. The case study is a paper-towel dispenser, and four alternatives are analysed. We then conclude in Section 5 with our discussion and further perspectives of study.

User-centred eco-design strategies, from technological to behavioural approaches

The ecological impact of use, when using the LCA, is approached in a non-realistic, simplified way. This can be understood from several points of view. It can be understood as a result of LCA being developed and further improved mainly within technical disciplines, such as mechanical engineering. This results in overlooking the human-product interaction part of the product, and how this actually contributes to overall impact. It can be further added that communication between technically driven ecological design and user-centred design is not common. Other reasons may come from the dramatical increase in data gathering technologies, yet not in data interpretation. While the inclusion of adaptive capabilities in products is growing, the uncertainties and dynamics of the user environment are also increasing. In facing the complex problem, practical analysis tends to keep to the minimal risk, thus reducing the potential of innovative solutions. Finally, it can be understood also as a problem of expertise, as exposed by Millet et al. (2007), who recommends the LCA to be used in the development of new concepts for strategic evaluation purposes.

From user free-will to product coersion

Eco-strategies that focus in the use phase of the product life cycle are limited, yet advancing rapidly. This could be viewed as the result of the extensive research that has been made from both side of the

spectrum: on one side, the environmental assessment of products, on the other the user-production interaction.

Behaviour-driven design has understood for a time the different stages of interaction of a user with a product. Lilley (2009) has presented a comprehensive classification of them, by using the criterion of where the power of decision is (Figure 30). In the level "eco-feedback", the power of decision is entirely on the user side. The user decides to act (or not) upon the information received from the product about consumption. Examples of "eco-feedback" are the notices and labels that inform users about how best to use the product. If positioned in the level "behaviour steering", there is more than just information flowing to the user. The product has specific components or features that facilitate or encourage a correct use (environmentally friendly in this case). Very simple examples of this are computers offering the possibility to regulate energy consumption by choosing to switch of the screen after a certain time, or in toilets with two flush modes, using more or less water. Finally, if positioned in the level "persuasive Technology" the user loses liberty and power of decision. The product is configured in such a way as to only work in the conditions intended. This, according to Lilley, guarantees a change of behaviour. Examples are lights in a room that switch off automatically as well as so called "intelligent" systems whose sensors work without the users' direct control. Work by Wever et al. (2008) has also focused on these kinds of interactions, but levels increase to four: "functional adaptation", "eco-feedback", "scripting", and "forced functionality". The last three could be coupled with Lilley's, while the "functional adaptation" approach envisions the design of a product that would adapt to whatever function the user needs. This, in simple products can be achieved, yet becomes a complex problem in products with potential by-uses (such as smart-phones, which are used for many things others than call other people on the phone). Another useful approach, although not directed to eco-design, is made by Lockton et al. (2010) and King and Tester (1999). The former propose a design method centred on user behaviour, and aiming at achieving a product use in real life that would match the intentions of the development team. The latter present a general overview of what persuasive technology can do to influence behaviour.

We could say that in the feedback scope (in which the "eco-feedback" falls) a lot has been done, yet not always from an environmental point of view. This richness could be because information can be conveyed to the user by several ways, mostly without reconfiguring the product. Nevertheless, one of the drawbacks of this is that the focus of these works is usually on consumer or the buyer, and not necessarily addressing the problems related with daily use. Interesting studies on perception have been: Goggin (1994) has studied the perception of eco-labelling, while Park and Tahara (2008) have tried to go further in the assessment of eco-design issues by focusing on the perceived quality and eco-efficiencies of consumers. Zai and Williams have studied the consumer acceptance of photovoltaic sources of energy, aiding in the design of strategies that could lead to easy adoption of environmentally friendly technologies Zhai and Williams (2012). Ornetzeder and Rohrer (2006) present a useful overview of different cases where users have been involved in the development of sustainable

energies. Park et al. (2007) have studied the effect of eco-efficiency on value perception of digital cameras.

Specifically addressing use, studies that acknowledge the need of a follow-up to improve products (yet not for environmental performance improvement) can be found in Abramovici and Lindner (2011). Bonner (2009) reports insights on the relations between the user and home technology. Involving users in innovation is discussed by Peine and Herrmann (2012).

On the other levels, that involve some kind of product configuration modification, specific studies are more on the side of the companies, and thus academic reports remain limited. Yet, it can be said with relative confidence that one issue is still pending: how interaction between user and product changes in time.

A model to explore different eco-design strategies integrating Life Cycle Analysis

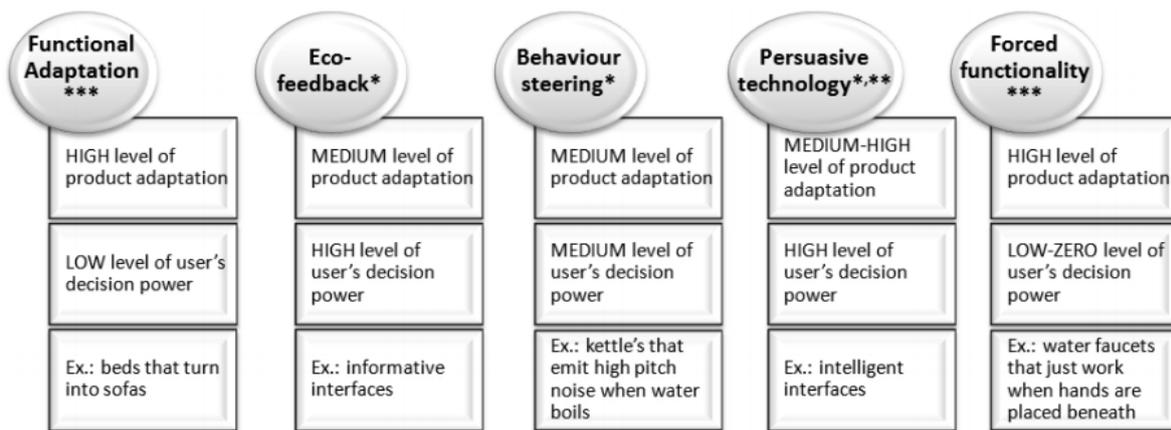


Fig. 30. Strategies from designing sustainable behaviour. (Lilley (2009), Fogg (1999), Wever et al. (2008))

As seen in the sections before, the interaction between user and product is not something fixed, but a dynamic process. It is always changing and the assumptions made in the preliminary phases of product design (regarding use) not always turn to be true. The need for a product that can adapt in time, when circumstances of use change, is more and more evident.

On the other hand, the life-cycle of a product, as stated, have been traditionally analysed considering an "average" use, which is constant in time and not representative of reality. In products whose use phase impacts the environment in a significant way, this can result in a distorted life-cycle assessment.

Our hypothesis is that a model can be built to include the evolution of a user-product interaction in time for ecological impact calculations.

We propose the Dynamic Eco-strategy Explorer Model (DEEM) that can aid making strategic decisions in terms of the projected use of a product. Specifically, the model has the main objective of helping

product development teams when designing environmentally friendly products. This help concerns the strategies to be used to achieve this environmentally friendly use and the ecological impact they would have. It has been discussed previously that eco-strategies have a limited life span. The DEEM can explore the different scenarios for the different eco-strategies considered, piloted by a criterion called Mitigation Rate, which will be explained in the subsequent subsections.

The DEEM is closely linked with the life-cycle analysis (LCA) as it will be seen. It approaches it to scenarios of use that could reflect real changes in time for the use phase. In order to calculate the necessary life-cycle analysis (LCAs), the software chosen is SimaPro (Goedkoop et al. (2010)). On the other hand, to assess the impact, a singlescore method is used: the Eco Indicator 99 (Goedkoop and Spriensma (2001)). It considers impacts on human health, as well as on ecosystem quality and resources. The Eco Indicator 99 calculates a single score that, although relatively controversial, facilitates the rapid comparison between different product/process alternatives.

Building DEEM

To construct the DEEM, we consider a global Life Cycle Analysis (LCA) calculation that takes in account the product and the consumed materials in use. It implicates in the calculations the LCA for the impact of the product's components, the life time of the product, the Mitigation Rate for the eco-strategy, which in turn affects the quantity of any material associated with the use of the product (for example, the paper towels used in a paper towel dispenser); and the LCA of the functional unit of this material consumed in use. The formulation considered is:

$$GLCA = LCAP + (LCAc \times Cref \times Nu \times Ny \times MR)$$

Eq. 1. Expression of the global LCA for the product

where

GLCA is the Global LCA for the product considering the strategy,

LCAP is the LCA of the product, including any extra components added to achieve the eco-strategy, as well as the energy consumed is the strategy considers a product modification that consumes extra energy

LCAc is the LCA of the material or resources consumed (the consumables) during use by means of the product,

MR is the Mitigation Rate,

Cref is the Reference Consumption of the consumables per year, per user, Nu is the number of users considered, Ny is the number of years considered.

Mitigation Rate

The Mitigation Rate (MR) is a projection of the performance of an eco-strategy in time. It considers an exponential decrease regarding the eco-strategy's success in promoting an environmentally friendly use. The MR is an evident necessity when the eco-strategy leaves the decision power on the user's

hands (see 2.1. Nevertheless, even forced functionality eco-strategies might lose its efficacy in time. The aim of the projection of the MR is to understand how different eco-strategies might affect the environmental impact derived from the consumption of resources by the product (e.g., electricity) or any material that is associated with the use of the product (e.g., paper towels for a paper towel dispenser). This impact is not only related with the MR, but also with the global LCA of the product. The projection of the MR enables the development team to know the performance needed for the eco-strategy to be worth in environmental terms. It helps decide up to what point an eco-strategy that involves investment in product modification needs to be effective, or how efficient an eco-strategy based on the modification in the information flow needs to be.

The MR calculation is not a fixed value that works for all cases in all circumstances. It is calculated with several variables open to modification by the team, as will be explained. The equation used is,

$$MR = I_{t0} \times e^{\frac{-CMR \times t}{T-t}}$$

Eq. 2. Expression of the mitigation rate

where

I_{t0} is the projected improvement (in relation with conditions before the eco-strategy is implemented) in consumption levels (reduction of consumption) of consumables thanks to the implementation of the eco-strategy at time 0,

CMR is the Coefficient of Mitigation Rate in eco-strategy performance,

T is the set of numbered segments in which the projected use life of the product is divided.

The calculation give out a series of data that can be graphed. It must be noted that the period of time in which the eco-strategy works could be shorter than that of the use phase of the product (considered in the LCA). If so, it should be decided if the eco-strategy will be substituted with another one.

To illustrate, let's assume that a product with a use-life of 5 years consumes certain material or resources. An eco-strategy is projected. The development team can extract I_{t0} and CMR from field experiments. In a year period, the evolution of the Mitigation Rate could be considered with an initial improvement I_{t0} 80% of initial improvement and a Coefficient of Mitigation Rate in eco-strategy performance CMR of 20% (Figure 31). The whole life is segmented of 5 years is segmented in t of 60 months. Consumption will gradually tend to return to the initial levels (reference levels of consumption have been normalized to 1, as 100%).

The development team can then decide to implement a new eco-strategy each year to face this eventuality. It can then project a scenario where each year a new strategy with the same performance as the first one is launched. Figure 32a shows a scenario like this.

The case shown in the scenario in Figure 32a can still be approached to the real circumstances if the fact that each time an eco-strategy is implemented, its performance can change. Figure 32b, for example, considers an optimistic scenario, in which each new launch of eco-strategy would improve little by little its performance, while succeeding in lowering its loss of efficacy through time. Adaptation of the eco-strategy must be decided at each interval by the development team. This can be achieved through the concept GULC (Serna-Mansoux et al. (2012)). Its aim is to monitor and improve environmentally friendly interaction with the product. The concept can be understood in general terms to follow four steps: 1) the calculation of the environmental impact of the product, 2) the definition of an interaction strategy for the use phase aiming at environmentally friendly performance, 3) the follow-up of the user's actual use of the product, and 4) the improvement of the strategy to steer the user to go towards the minimum environmental impact. With the use of GULC, the curve of consumption can be followed-up, and the strategy adapted to improve performance.

The MR can then be appreciated in terms of different scenarios and the development team can set its goals regarding the eco-strategy. This will be illustrated in the case study presented in the next section.

The integration into the general design process

In the case of eco-design strategies and the exploration of their potentials, a reference product almost always exists. The work here presented is positioned then in the realm of a redesign process. On the other hand, redesign processes are guided by those parameters the development team chooses to take in account. A thorough overview can be found in Smith et al. (2012). In the context of eco-design, as discussed before, the objective is traditionally to lower the environmental impact of the product. We propose a general redesign method implicating the DEEM, illustrated in Figure 33. It is deployed as follows:

1. CHOOSE. In this phase, the product to be redesigned is analysed. Not all of the product's attributes are targeted for improvement. Under an eco-design approach for example, those attributes related with environmental impact are chosen. It is important to emphasize though, that as a result of the bibliographical revision made, it is reminded that the attributes related with human-product interaction in use phase must be included.
2. UNDERSTAND. In this phase, the way the attributes come to be, why they have the nature they have, and how they amount for the product whole configuration is understood. This gives the necessary information and tools to be able to do the next phase. In this phase, the LCA tools like SimaPro are used.
3. EXPLORE. Different sensitivity analysis and simulated scenarios are then modelled and run. The objective is to create a solution space where different options are visualised, and the impact of the improvements targeted assessed.

4. DECIDE. Out of all the alternatives simulated, the development team can then choose those with more promise. The prototyping, whether virtual or physical, can be done only for a reduced number that fit the region of the solution space considered to be acceptable.
5. TEST. A virtual or physical prototype is tested. Normally, the development team will launch different kind of experiments, depending on what they are measuring.
6. IF. The results of the test in terms of the level of improvement first targeted will lead either to the production phase, or to the return to the solution space, if the levels are not acceptable. It must be noted that the loop can return to any point prior to the one illustrated in Figure 34.

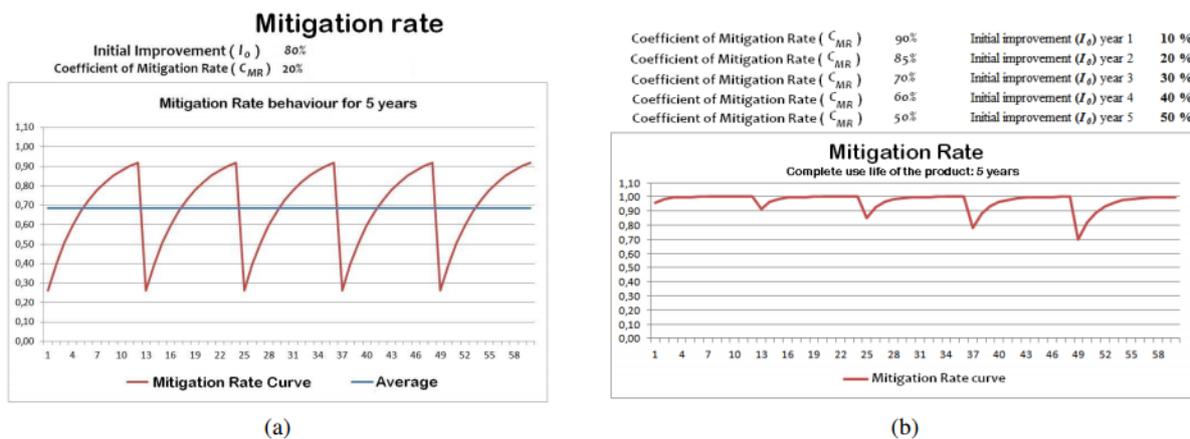


Fig. 32. Exploring different eco-strategy behaviours

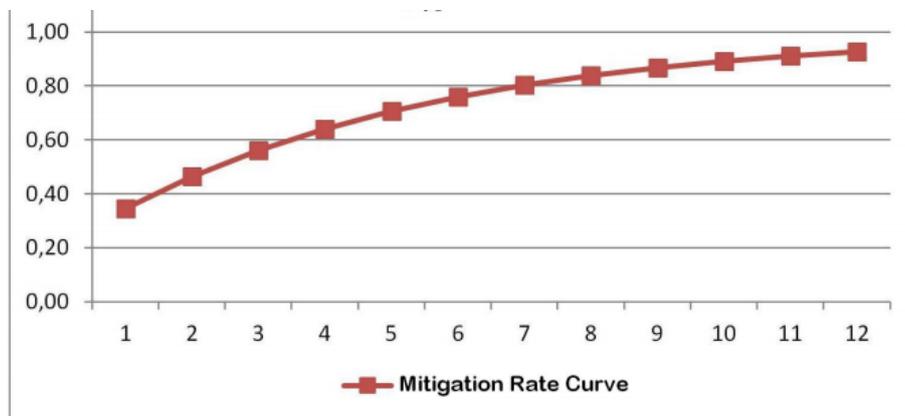


Fig. 31. Mitigation rate for a year period

The DEEM is used in the phase "EXPLORE", where the construction of the solution space and its exploration is being made.

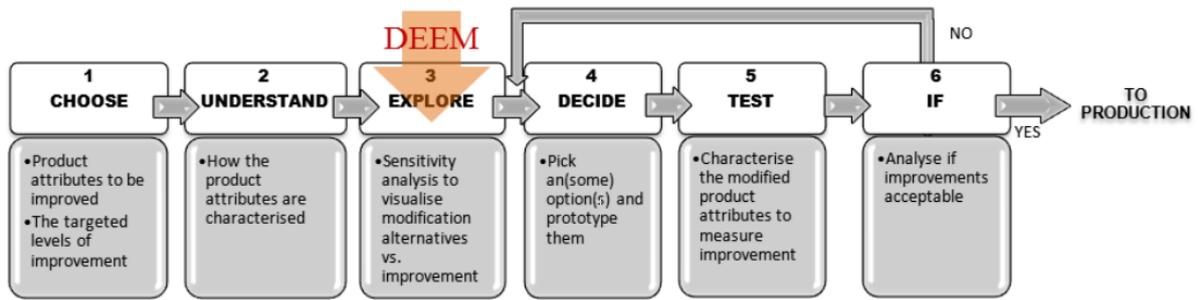


Fig. 33. Redesign process and DEEM

The paper towel dispenser

We present the case study of the paper dispenser. The experiment consists of doing the life-cycle analysis of several alternatives of paper towel dispensers. The aim is to identify the best concepts in terms of environmental performance through out the whole product life. The different ways to deliver an eco-strategy generate different paper consumptions reductions. On the other hand, they also generate different environmental impacts when produced.

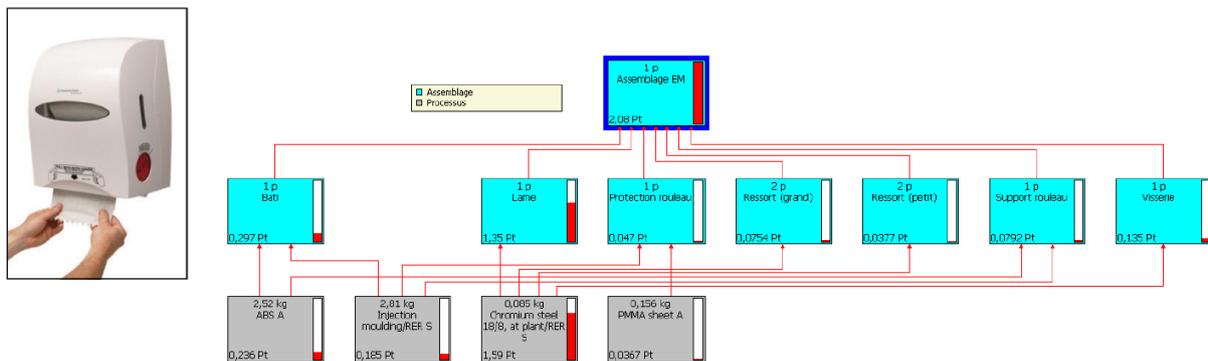


Fig. 34. LCA decomposition for existing paper towel dispenser

We then use the DEEM, which models both the reduction in consumption envisaged by the strategy, and the environmental impact any modification to the original product might generate. DEEM will help in choosing the best strategy based on the final balance between the two.

The four options studied are:

1. The existing paper towel. It has a certain paper consumption on average, and a certain environmental impact. We consider this product the reference point to start.
2. A modified paper towel with a sticker. By placing a message on the sticker, the user has feedback on the effects of over-consuming paper towels.
3. A modified paper towel with a flag. This flag is projected to move into the user’s champ of vision once he/she has consumed a minimum quantity of paper (calculated to be enough to dry the hands). The message then is more specific and works only when the user is in real conditions of wasting paper.

4. A modified paper towel with an LCD screen attached. This modification enables changing the messages from time to time. This can make the messages effective more time than a sticker, which is unchangeable.

We use then the DEEM to calculate the environmental impact of each option, following the equations presented earlier.

CHOOSE-UNDERSTAND. The existing paper towel

The paper towel studied works by pulling the paper towels. The artefact stops at certain length, which is measured as 1 paper towel. The user can pull the number of times he wishes, always getting a paper towel the same size. It is considered for the product to have a 5 year use life. As stated before, the tool used for LCA is SimaPro version 7.3.3. multiuser. The reference calculation model is EcoIndicator99 (EI99) (Goedkoop and Spriensma (2001)). SimaPro is used to gather all environmental impacts and summarize them in one score expressed in points. It is thus easy to compare different processes, products and services in terms of their environmental efficiency.

We have then a product (without the paper consumption taken in account) impact of 2.08 pts. The general decomposition is shown in Figure 34. This illustration (as the rest of this type in the article) is abbreviated, showing only the general phases of the life cycle, and not the detailed processes.

If we consider the paper consumption in account, we take an average use of 3 paper towels per person, and around 14 persons that use the dispenser a day. This average consumption has been observed in previous work made by the research group Serna-Mansoux et al. (2012). In a year, the points then amount to 5.75 pts. As can be derived, the LCA for the product plus the consumption of paper towels amounts to 7.83 pts. for the whole life of 5 years. As can be seen, in the total of points, a considerable amount comes from use. This leads to the shift in focus to the use of the product, the consumption of paper towels, and the different strategies that can be implemented in the product to minimize this. To have a reference of the minimal use targeted, it is considered a person can dry her hands with an average of 1.5 paper towels per passage. This consumption in the circumstances previously stated (14 persons once a day), would reduce the yearly impact by half (to 2.87 pts.). In order to achieve this, several options are explored.

EXPLORE. Generalities

In order to compare the different alternatives, we have considered the intervals shown in table 7. This explores the different scenarios an eco-strategy would result in. In particular, we consider three:

Strategy 1. An informative sticker is placed on the product. This does not required a modification in product architecture to accommodate extra components.

Strategy 2. An informative flag is added to the product. This implies a modification in product architecture. The flag is intended to have a mechanism that would activate it whenever the consumption reaches a certain limit.

Strategy 3. An informative LCD screen is added to the product. This, although it could be just added to existing products, should result in extra energy consumption during the use-life of the product. It will be clarified how this energy is considered for the LCA of the modified paper towel.

Table 7
Exploration intervals for eco-strategy alternatives

Variable to explore	Sticker	Flag	LCD screen
Projected improvement in consumption levels $I_{t0}(\%)$	30%-40%	40%-50%	50%-60%
Coefficient of Mitigation Rate in eco-strategy performance $C_{MR}(\%)$	40%-50%	20%-30%	10%-20%
Period of duration of each message (no. of months)	1-3-6-12	1-3-6-12	1-3-6-12

The intervals considered grow in terms of improvement and decrease in terms of the Mitigation Rate in eco-strategy performance CMR because it is considered each eco-strategy has increased potential of success in terms of the previous one. Strategy 1, considering a sticker, it fairly limited in terms of adaptability and customisation of message. The sticker is in a fixed position with a fixed message all the time. On the other hand, the Strategy 2 considers a flag that activates whenever the limit of consumption (in this case decided to be at 1.5 paper towels) is reached. It could be then considered that the message is more focused on the persons that actually surpass the desired consumption and because of this, the potential of success could be greater. The Strategy 3 considers a LCD screen. This increases a little more the potential of success by enabling the message to be adapted in content, in time of display, and so forth. In Figure 35 the exploration is graphed in terms of the GLCA resulting of the calculations (1year vs. 5years). In the following subsections, the exploration is discussed according to the data Table 8. As for the paper towel dispenser without any eco-strategy, the consumption has been observed to be an average of 3 paper towels per person (Serna-Mansoux et al. (2012)).

EXPLORE. Strategy 1: eco-feedback via an informative sticker

We begin with the simplest solution: a sticker placed on the towel paper dispenser. This can inform, entice or even emotionally compel (by a message aimed at making the user feel guilty of excess use) a conscious consumption. We calculate the global impact by following the equation 1.

The LCA for the product with the sticker is shown in Figure 36. As can be observed, the impact of the sticker is so small, in relation with the product (0.000524 pts.), that the overall LCA continues to be 2.08 pts., as in the product without the sticker. This first calculation, however, considers the same sticker throughout the 5 year use-life of the dispenser.

It has been proven before, in Serna-Mansoux et al. (2012), that messages loose their efficacy in time. The strategy should then consider the periodical change of the message. The Mitigation Rate can be

explored in several options, shown in Table 8. The best three options of this strategy are then I, J, and M. The first two consider an improvement It_0 of 40%, a Coefficient of Mitigation Rate CMR of 40%, and a change of message monthly and each 3 months respectively. The third option M considers an improvement It_0 of 40%, a Coefficient of Mitigation Rate CMR of 50%, and a change of message monthly.

EXPLORE. Strategy 2: eco-feedback via a popping flag

We explore then the option of a paper towel dispenser with a popping flag. This flag would be activated to appear with a message each time the towel consumption have reached the targeted quantity (1.5 towels) and the user activates the paper towel mechanism to have more towels. This enables the information to be directed specifically to those users that are consuming more.

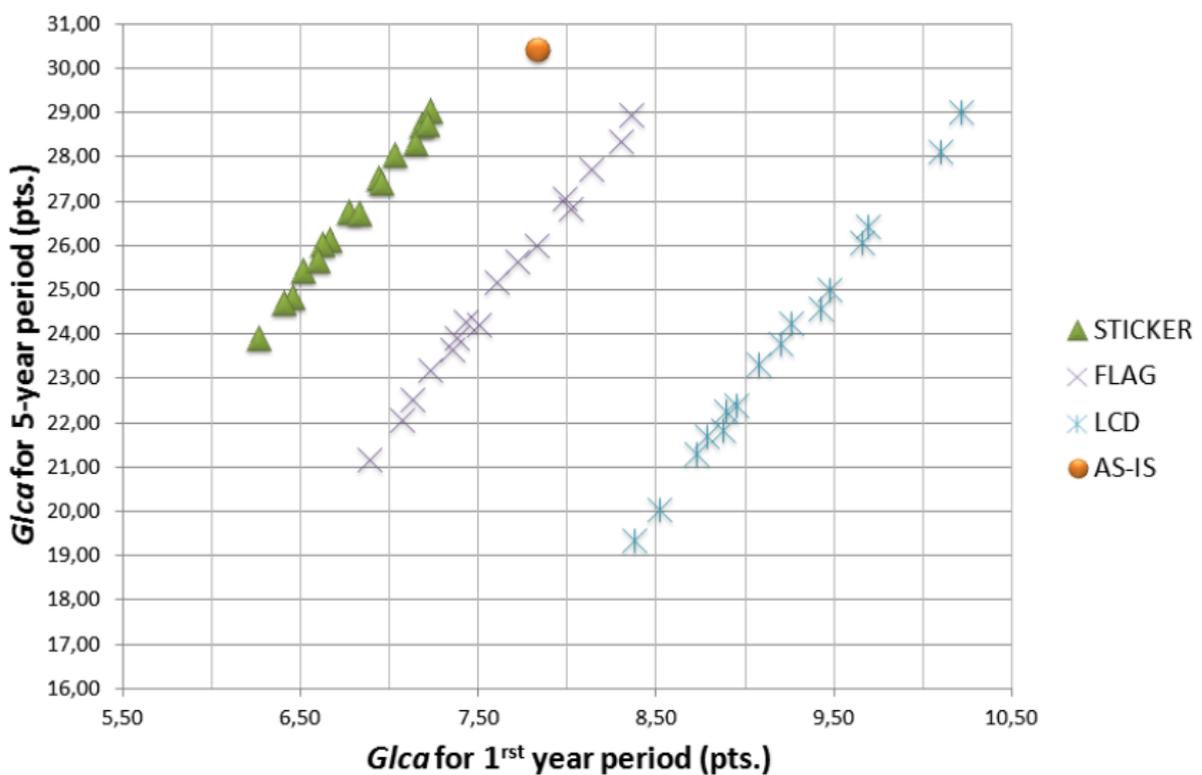


Fig. 35. GLCA 1 year vs 5 year for eco strategy exploration

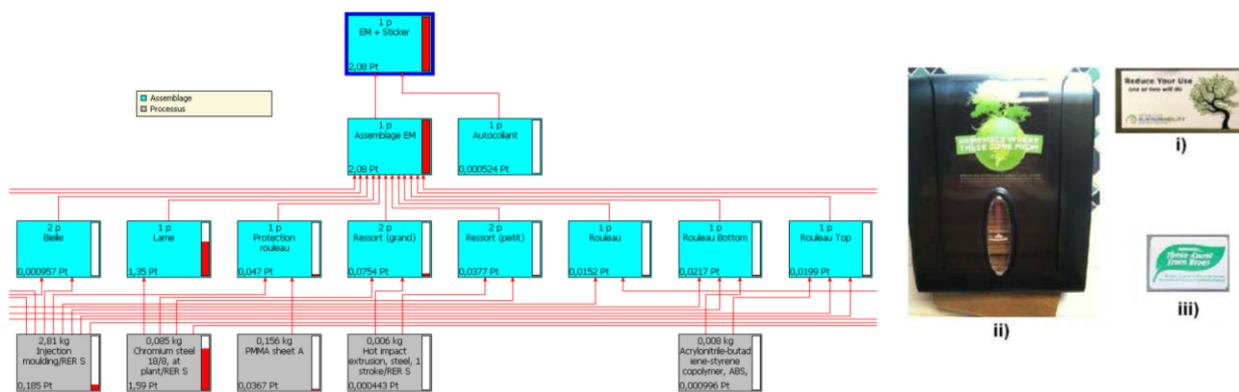


Fig. 36. LCA decomposition for paper towel dispenser with a sticker

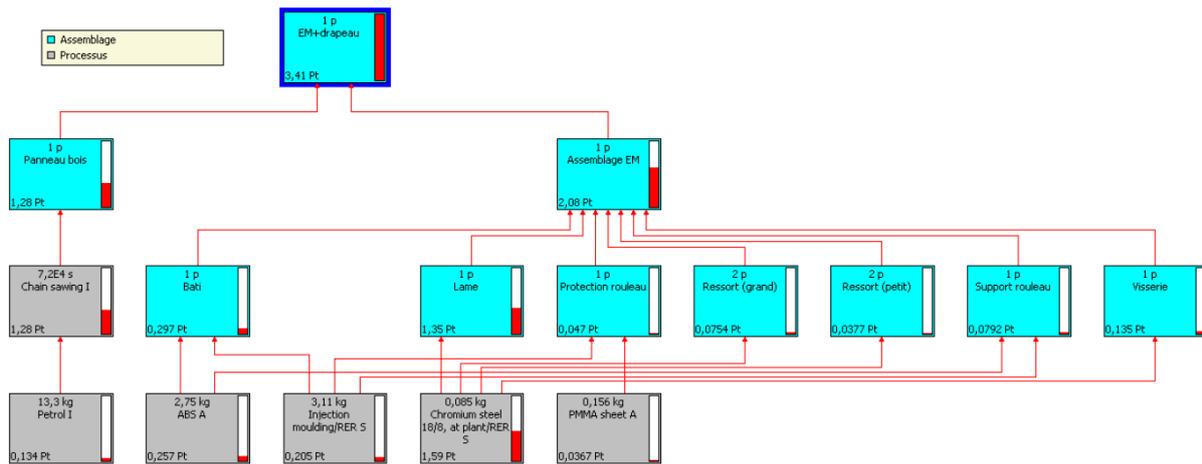


Fig. 37. LCA decomposition for paper towel dispenser with a flag

The LCA for the product with the flag is shown in Figure 37. In relation to the original product, whose LCA was 2.08 pts., the new product has increased in impact to 3.41 pts. DEEM is used here to know what kind of performance it would be needed from the eco-feedback to achieve the existing product's Glca of 7.83 pts., or 30.43 pts. in the whole 5-year period. The exploration results are shown in Table 8. The LCA of the sticker is added to the calculation, since it is projected for the message to be changed on the flag. The flag though, remains the same, and so it is envisioned to paste a sticker with a message in it periodically.

As can be observed, an interesting phenomenon appears. In some cases (as in options D, G, H, L, and P) even if the consumption is always reduced the GLCA for the first year is higher than existing product. Nevertheless, the GLCA for 5 years achieves lower levels than the existing product. This would mean the product should be planned to work for a medium to long term (5 years or more) to be an good choice environmentally speaking.

EXPLORE. Strategy 3: eco-feedback via an LCD screen

Considering the liberty and creativity that an LCD screen could give to the ECO-feedback, this is an interesting option to explore. This would enable the message to be constantly changed and the possibilities of reaching would theoretically be enhanced, since the LCD screen could use animation as part of the eco-feedback.

In order to calculate the environmental impact, though, this strategy has to take in consideration the energy consumed by the LCD screen throughout the life of the product. The considerations for the assessment are that the screen size is 4 inches, with a power of 5W. It considers also an operating span of 8 hours per day, 365 days per year throughout the 5 years life of the product. The energy mix considered for the assessment is the French one.

As can be seen in Figure 38, the LCA shows that the impact of the product with the LCD screen go up to 5.60 pts. for the first year and 7.45 pts. for the 5-year life of the product (from 2.08 pts. in the

original). In the exploration Table 8 it can be observed that the LCD strategy works better if considered in a 5-year span. This is important insight that can help the development team to plan the eco-strategy.

DECIDE. Discussions on exploration

In Figure 39, the solution space is explored. As can be seen, it is divided in quadrants from the origin point of the existing product. In the lower left corner, a limit of the solution space is marked. This

Table 8
Exploration for paper towel eco-strategies

OPTIONS	Consumption (1year) (qty towels)	Change (%)	Consumption (5years) (qty towels)	Change (%)	GLCA 1year (pts.)	GLCA 5years (pts.)
Product AS-IS	15,120	n/a	75,600	n/a	7.83	30.43
Sticker options (I_{10}-C_{MR}-message duration)						
Sticker A (30%-40%-1)	11,827	-22%	62,150	-18%	6.52	25.42
Sticker B (30%-40%-3)	12,218	-19%	64,105	-15%	6.66	26.13
Sticker C (30%-40%-6)	12,969	-14%	67,858	-10%	6.94	27.53
Sticker D (30%-40%-12)	13,605	-10%	71,036	-6%	7.18	28.72
Sticker E (30%-50%-1)	12,109	-20%	63,749	-16%	6.63	26.02
Sticker F (30%-50%-3)	12,508	-17%	65,745	-13%	6.77	26.74
Sticker G (30%-50%-6)	13,211	-13%	69,262	-8%	7.04	28.06
Sticker H (30%-50%-12)	13,373	-9%	71,892	-5%	7.23	29.04
Sticker I (40%-40%-1)	11,150	-26%	58,087	-23%	6.27	23.89
Sticker J (40%-40%-3)	11,671	-23%	60,694	-20%	6.46	24.85
Sticker k (40%-40%-6)	12,672	-16%	65,698	-13%	6.83	26.72
Sticker L (40%-40%-12)	13,519	-11%	69,934	-7%	6.43	28.31
Sticker M (40%-50%-1)	11,525	-24%	60,218	-20%	6.41	24.69
Sticker N (40%-50%-3)	12,057	-20%	62,880	-17%	6.60	25.67
Sticker O (40%-50%-6)	12,995	-14%	67,569	-11%	6.95	27.42
Sticker P (40%-50%-12)	13,696	-9%	71,076	-6%	7.22	28.74
Flag options (I_{10}-C_{MR}-message duration)						
Flag A (40%-20%-1)	10,182	-33%	52,651	-30%	7.23	23.19
Flag B (40%-20%-3)	10,577	-30%	54,624	-28%	7.38	23.90
Flag C (40%-20%-6)	11,504	-24%	59,258	-22%	7.72	25.64
Flag D (40%-20%-12)	12,615	-17%	64,816	-14%	8.14	27.72
Flag E (40%-30%-1)	10,707	-29%	55,588	-26%	7.43	24.29
Flag F (40%-30%-3)	11,187	-26%	57,989	-23%	7.61	25.17
Flag G (40%-30%-6)	12,202	-19%	63,062	-17%	7.99	27.06
Flag H (40%-30%-12)	13,206	-13%	68,081	-10%	8.36	28.94
Flag I (50%-20%-1)	9,263	-39%	47,229	-38%	6.89	21.15
Flag J (50%-20%-3)	9,756	-35%	49,695	-34%	7.07	22.06
Flag k (50%-20%-6)	10,915	-28%	55,487	-27%	7.50	24.22
Flag L (50%-20%-12)	12,304	-19%	62,435	-17%	8.02	26.83
Flag M (50%-30%-1)	9,919	-34%	50,899	-33%	7.14	22.53
Flag N (50%-30%-3)	10,519	-30%	53,901	-29%	7.36	23.63
Flag O (50%-30%-6)	11,787	-22%	60,243	-20%	7.83	26.01
Flag P (50%-30%-12)	13,042	-14%	66,516	-12%	8.30	28.36
LCD screen options (I_{10}-C_{MR}-message duration)						
LCD A (50%-10%-1)	8,485	-44%	42,905	-43%	8.78	21.69
LCD B (50%-10%-3)	8,790	-42%	44,429	-41%	8.90	22.26
LCD C (50%-10%-6)	9,595	-37%	48,453	-36%	9.20	23.77
LCD D (50%-10%-12)	10,814	-28%	54,550	-28%	9.66	26.06
LCD E (50%-20%-1)	9,263	-39%	47,229	-38%	9.08	23.31
LCD F (50%-20%-3)	9,756	-35%	49,695	-34%	9.26	24.24
LCD G (50%-20%-6)	10,915	-28%	55,487	-27%	9.70	26.41
LCD H (50%-20%-12)	12,304	-19%	62,435	-17%	10.22	29.02
LCD I (60%-10%-1)	7,410	-51%	36,618	-52%	8.38	19.33
LCD J (60%-10%-3)	7,776	-49%	38,447	-49%	8.52	20.02
LCD k (60%-10%-6)	8,742	-42%	43,275	-43%	8.88	21.83
LCD L (60%-10%-12)	10,205	-33%	50,592	-33%	9.43	24.57
LCD M (60%-20%-1)	8,344	-45%	41,806	-45%	8.73	21.28
LCD N (60%-20%-3)	8,935	-41%	44,765	-41%	8.95	22.39
LCD O (60%-20%-6)	10,326	-32%	51,717	-32%	9.47	25.00
LCD P (60%-20%-12)	11,993	-21%	60,054	-21%	10.10	28.12

boundary is defined by the lowest possible consumption of paper towels (which in the beginning of the section was set at 1.5 paper towels per person), and the existing products points out of the LCA. The target then is to achieve the lowest consumption possible while keeping (at least) the same product environmental impact. As it can be appreciated, the solution space is divided into:

I. The improbable outcome quadrant. This region of the solution space is where the alternatives with a lower score in the LCA at a 5 year calculation than at one year calculation, in relation with the existing solution.

II. The unacceptable strategy quadrant. This region of the solution space is where the alternatives that have both a yearly and a 5-yearly score higher than the existing solution. Independently of the fact that the eco-strategy may be helping in lowering consumption of paper towels, the overall impact is not desirable.

III. The acceptable strategy quadrant. This region comprises the alternatives that have managed to keep a Glca score below the existing product (yearly, and through the 5-year use life of the product). The more the alternative is close to the lower left corner of the quadrant, the more acceptable it is.

IV. The long term strategy quadrant. This region could be considered if the solutions explored in quadrant III seem difficult to achieve. In it, the alternatives that have a higher Glca score in a year's time than the existing product, but lower in the 5-year use-life of the product. This means that in the long run, the strategy considered for the alternative results in a lower environmental impact.

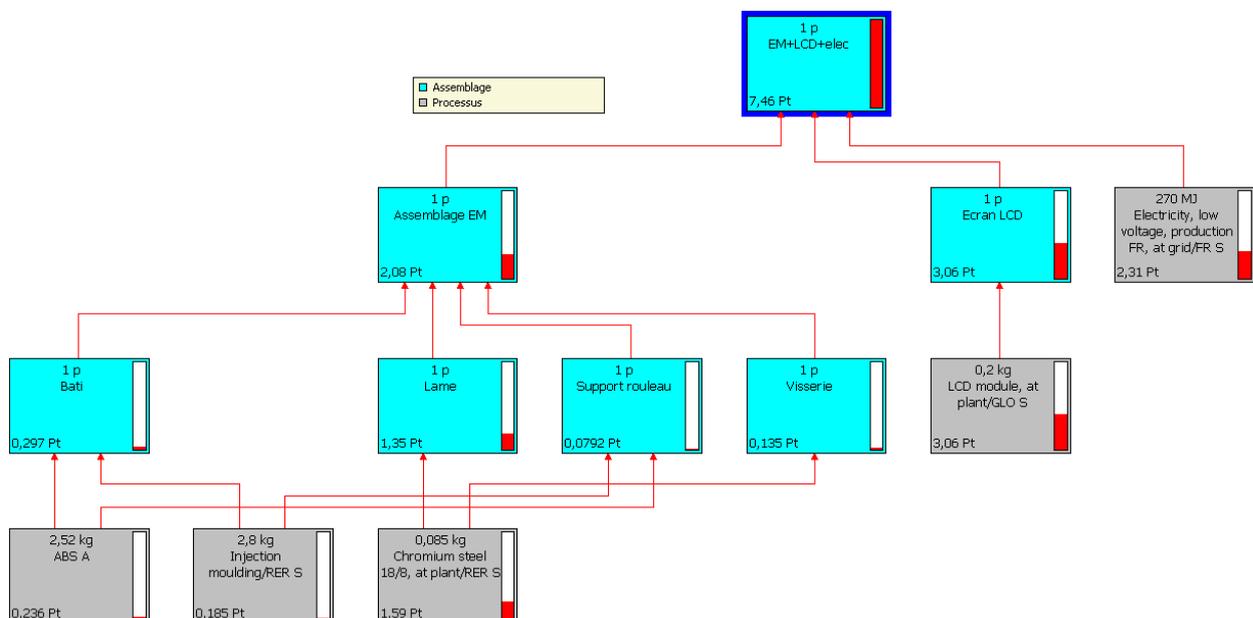


Fig. 38. LCA decomposition for paper towel dispenser with a LCD screen

From Figure 40, we can deduce that all the options in the eco-strategy that considers a sticker are acceptable. In the flag's case, 5 are in the quadrant IV (long-term strategy), one in the limits between

quadrants III (acceptable strategy) and IV, and the rest quadrant III. As for the eco-strategy considering an LCD screen, all are found in quadrant IV. From this we can see that the LCD screen strategy is only pertinent if considered long-term (that is, 5 years or more). From those solutions, we concentrate in the best 2 of each eco-strategy. These would be the ones that are closer to the target limit: options I and I for the sticker eco-strategy, options I and J for the flag eco-strategy, and options I and J for the LCD screen eco-strategy (Table 9).

The options for the sticker have relatively modest targets in terms of performance of the eco-feedback to be placed on the sticker. On the other hand, the best solutions for the eco-strategy that considers a LCD screen have far more ambitious levels of success in terms of the eco-feedback to be communicated. They would have to achieve a 60% improvement in consumption (which is reduction in consumption), and would need to nearly maintain this efficacy, with just 10% of loss in performance through time.

At this point the development team can discuss the feasibility of the options listed, or even of the rest of the options in the solution space quadrant that's acceptable. Experimentation with different alternatives can be focused just in those that promise to work, thus aiding in the eco-design strategy for the product.

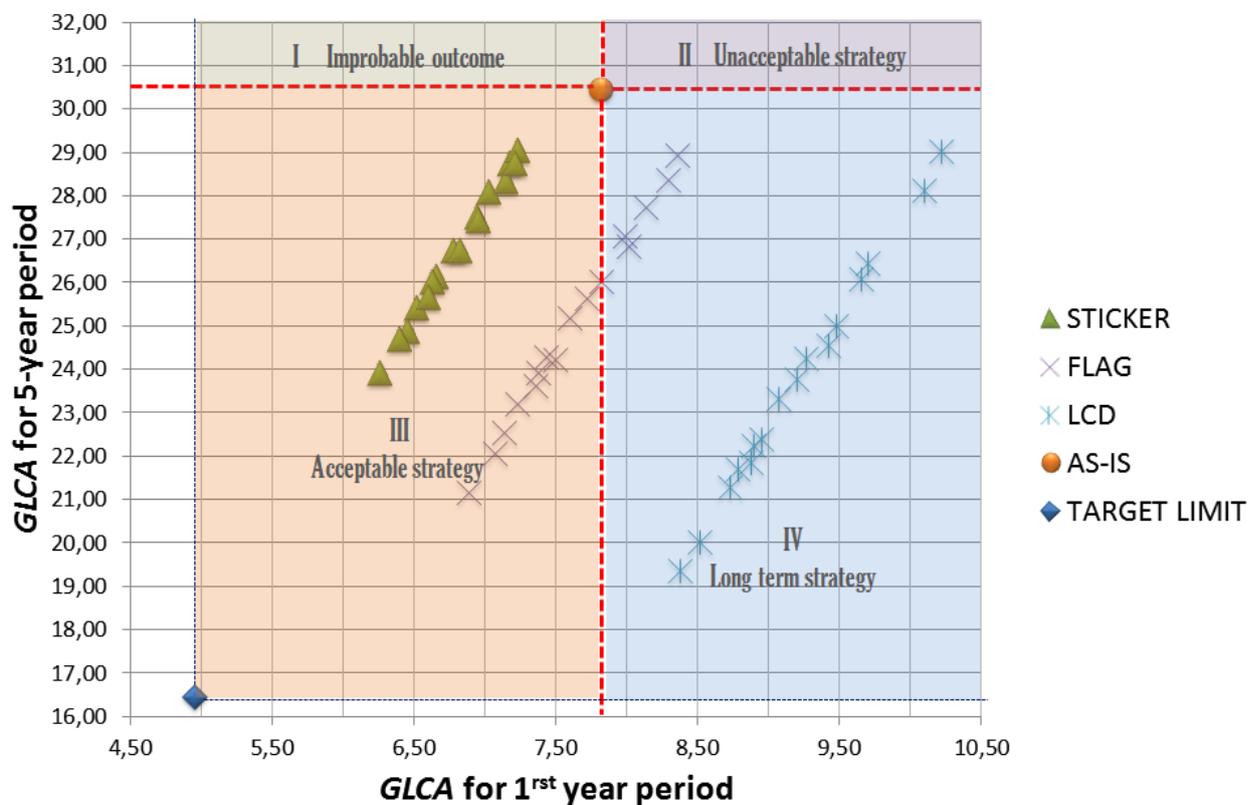


Fig. 39. Exploration space for eco-strategy alternatives

Sensitivity Analysis

A sensitivity analysis is useful in the exploration of solutions, in that it shows how the result would be affected by the variations in key parameters and their interaction. In this case, we perform a simple multi-way sensitivity analysis with specific variations, to show the general tendency of the model.

In our case study of the paper towel dispenser we then explore further possibilities in the realms of the product lifespan, the volume of users exploiting the product and the variabilities the impact of the consumables may have.

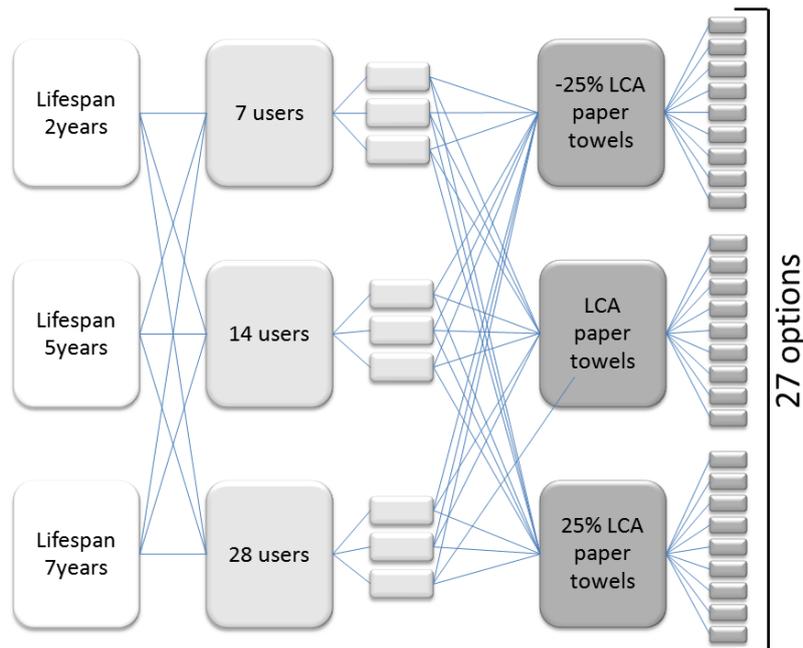


Fig. 40. Variations for sensitivity analysis

Table 9
Six best options in eco-strategy alternatives

CONTEXT/EXPLORATION	AS-IS*	Option I Sticker	Option M Sticker	Option I Flag	Option J Flag	Option I LCD screen	Option J LCD screen
Projected improvement $I_{10}(\%)$	n/a	40%	40%	20%	20%	60%	60%
Projected Coefficient of Mitigation Rate $CMR(\%)$	n/a	40%	50%	20%	20%	10%	10%
Period of each message (no. of months)	n/a	1	1	1	3	1	3
Paper Towel Consumption before observation (1-year period) (no. of paper towels)	15,120	11,150	11,525	9,263	9,756	7,410	7,776
Change in consumption (whole use life)(%)	n/a	-23%	-20%	-38%	-34%	-52%	-49%
Glea (LCA points 1-year period)	7.83	6.27	6.41	6.89	7.07	8.38	8.52
Glea (LCA points 5-year period)	30.43	23.89	24.69	21.15	22.06	19.33	20.02

AS Figure 40 shows, the variations we took in account are a lifespan of 2, 5, and 7 years. In terms of the volume of users, we considered 7, 14, and 28 users using the paper towel dispenser daily (once). Finally, we consider a variation of the LCA result for the environmental impact of the consumables (the paper towels) of $\pm 25\%$

We chose for the sensitivity analysis the three best options according to Table 9, which are the options I for each alternative. The results are grouped first in terms of the product lifespan, and within each of those groups, the different options can be assessed vs. the original product. All these variations are shown in Figures 41, 42, and 43.

As can be appreciated, the LCD screen alternative will have a better performance almost always when the number of users goes up to 28. Except for the case where the product lifespan is 2 years, and the LCA for the consumables is reduced by 25%. There, the alternative considering the sticker is marginally better.

When considering 14 users (as in the original case study), we can see that the tendencies are kept throughout the variations of the LCA for the consumables. The tendencies favour the option with the sticker when the lifespan of the product is 2 years. But when the lifespan of the product is augmented, the tendency inclines towards the solution with the LCD screen. This could be understood since the option of the LCD screen is assumed to be more efficacious to reduce consumption, while the sticker option, even if the environmental impact of the implementation is not so relevant, is assumed to work less efficaciously. The fact the the LCD screen impact is distributed through more years helps too.

When few users are considered (7 users) LCD screen tends to be work in very specific cases. For example, when the lifespan of the product is projected at 2 years, the sticker option is the best performer by far. When the lifespan is extended to 5 years, the sticker option and the LCD are closer to one another in performance, but the sticker option is still marginally better. When the lifespan is extended to 7 years, and the LCA of the consumables (the paper towels) is reduced by 25%, the sticker option is better by very little. When the LCA is kept at its original level, or augmented by 25%, the

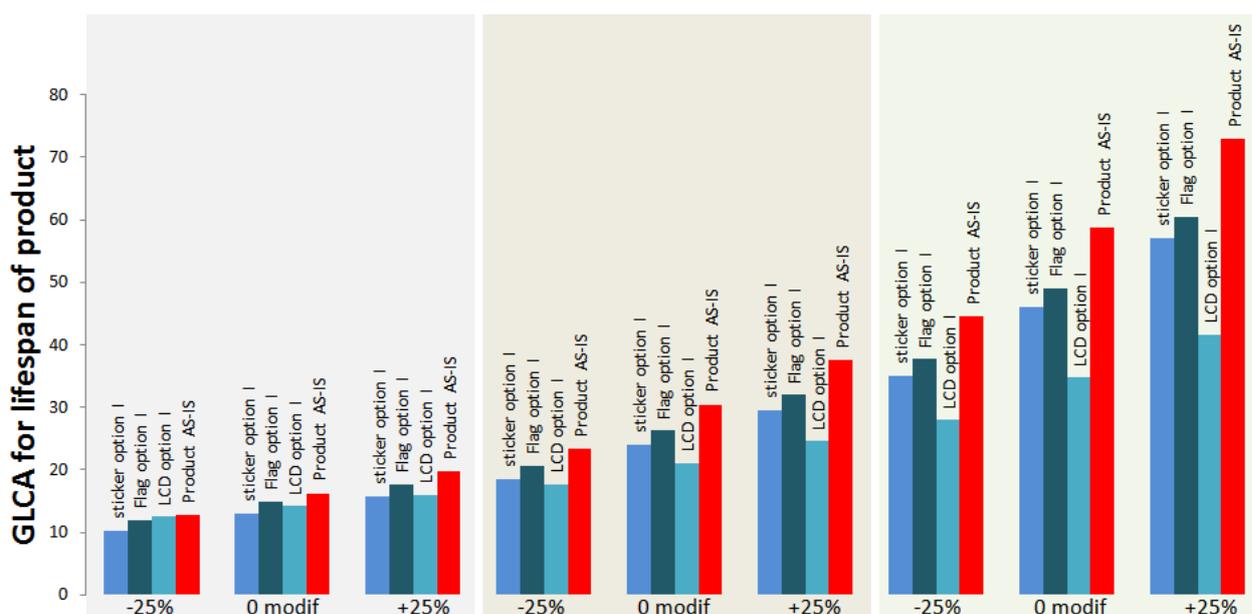


Fig. 41. Sensitivity analysis – Lifespan 2 years

solution considering the LCD screen takes a very modest lead. The flag option is always in the middle of the other two, never managing to be in the lead.

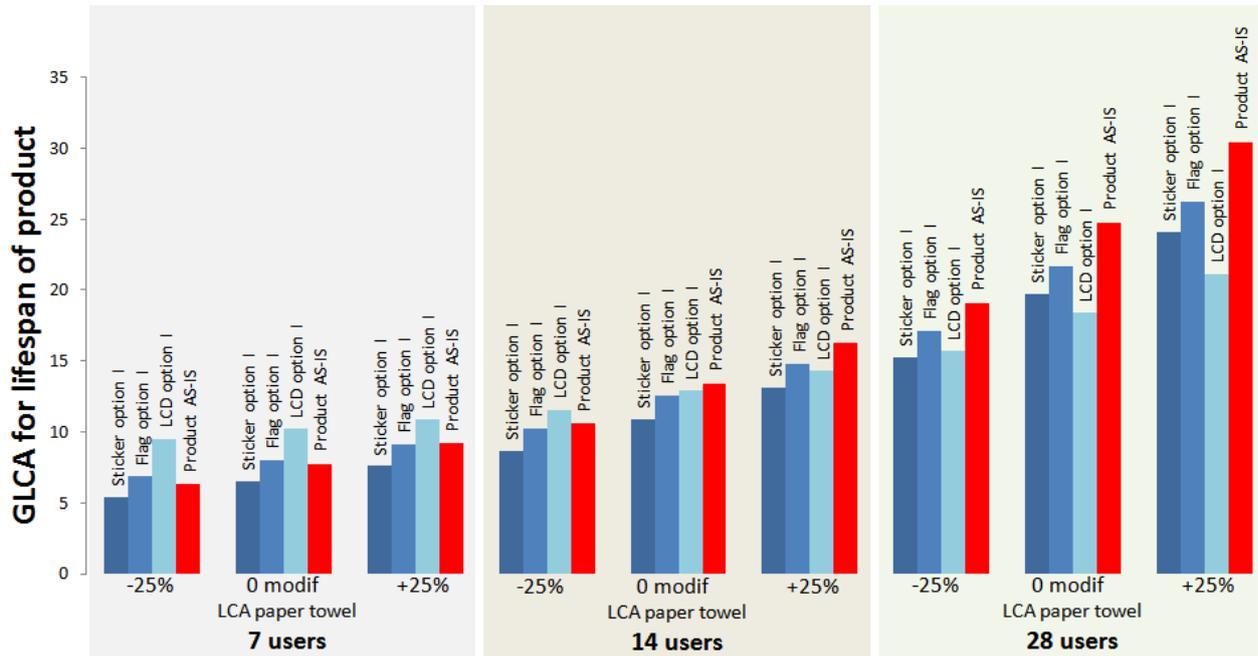


Fig. 42. Sensitivity analysis – Lifespan 5 years

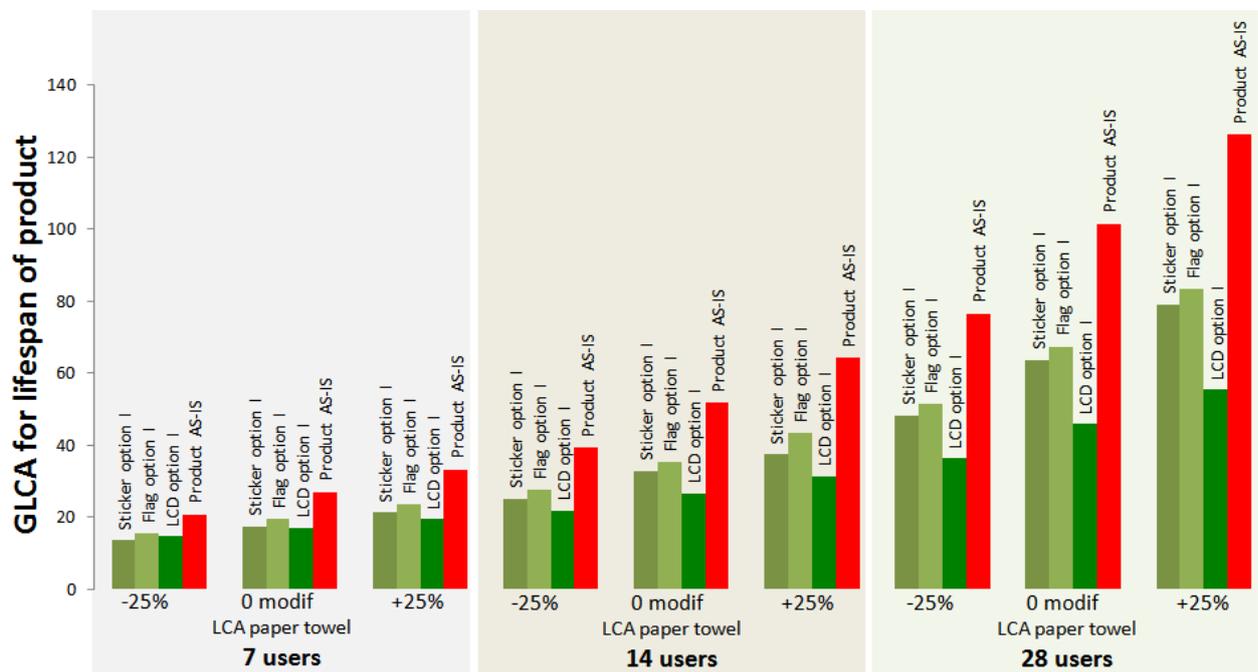


Fig. 43. Sensitivity analysis – Lifespan 7 years

Discussion and perspectives

The different experimentations and results presented shows us the multiple possibilities when confronted with the eco-design problem. The difficulties in assessing with accuracy the information needed to validate all the exploration and sensitivity models become clear as well. It is evident that

one of the main challenges of the eco-strategies is the prediction of its performance. This is why an approach that considers the follow-up of the user's interactions with the product is preferred. The adaptation of the eco-strategy, as proposed by the work in (Serna-Mansoux et al., 2012) promises the optimal application of the Dynamic Eco-strategy Explorer Model (DEEM).

In conclusion, we have presented what we have called the Dynamic Eco-strategy Explorer Model (DEEM), aimed at aiding in the development of a strategy focused on the environmentally friendly use. Specifically, it considers the consumption of resources (energy, water, etc.) or consumables as the target to be reduced. This DEEM acknowledges the fact that the different eco-strategies embedded on a product can have different impacts in consumption levels. Most importantly, their efficacy in driving the user towards an eco-use can diminish in time. To consider this, a Mitigation Rate is proposed. This rate is a projection of the performance of an eco-strategy in time, and it is modelled as an exponential decrease that results in the user returning to original levels of consumption. Coupled with an LCA of the product and of the consumables, the actual utility of a strategy can be assessed. We have presented a case study, the paper towel dispenser. In this case study, we have studied different alternatives for the eco-strategy. DEEM has been used to explore the solution space and show how to determine the best options. Once these options have been pinpointed, we propose a further sensitivity analysis to enlarge the universe of possibilities to key parameters that could influence the performance of the solutions. We can appreciate how solutions change in performance depending on variations in terms of number of users, lifespan of the product, or the environmental impact (calculated via the LCA) of the consumables. The best strategy can be then understood as a combination of parameters, some of which the industry or company to which the product development team belongs can control, some of which it cannot. The panorama via our DEEM is nevertheless, rationalized, and better decisions can be taken.

References

Abramovici, M., Lindner, A., 2011. Providing product use knowledge for the design of improved product generations. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 60, 211 – 214.

Alameda County, C., 2012. Waste reduction - paper towels. Website: <http://www.acgov.org/sustain/what/wastereduction/towels.htm>.

Bonner, J.V., 2009. Adding critical sensibilities to domestic communication technologies. *International Journal of Human-Computer Studies* 67, 215 – 221. *ice:title;The family and communication technologies;/ce:title;.*

Cerdan, C., Gazulla, C., Rauegi, M., Martinez, E., i Palmer, P.F., 2009. Proposal for new quantitative eco-design indicators: a first case study. *Journal of Cleaner Production* 17, 1638 – 1643.

Finnveden, G., Hauschild, M.Z., Ekvall, T., Guine, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., Suh, S., 2009. Recent developments in life cycle assessment. *Journal of Environmental Management* 91, 1 – 21.

Fogg, B., 1999. Persuasive technologies. *Communications of the ACM* 42, 27–29.

Goedkoop, M., Schryver, A.D., Oele, M., Durksz, S., de Roest, D., 2010. Introduction to LCA with SimaPro 7. Technical Report. Pr Consultants.

Goedkoop, M., Spriensma, R., 2001. The Eco-Indicator 99: A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment. Technical Report. Pr Consultants B.V., Amersfoort, The Netherlands.

Goggin, P.A., 1994. An appraisal of ecolabelling from a design perspective. *Design Studies* 15, 459 – 477.

Gruden, D., 2003. Traffic and Environment (The Handbook of Environmental Chemistry / Anthropogenic Compounds). Springer.

Hauschild, M., Jeswiet, J., Alting, L., 2004. Design for environment - do we get the focus right? *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 53, 1 – 4.

Hauschild, M., Jeswiet, J., Alting, L., 2005. From life cycle assessment to sustainable production: Status and perspectives. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 54, 1 – 21.

Herrmann, C., Bergmann, L., S., T., Halubek, P., 2007. Total life cycle management - an integrated approach towards sustainability, in: 3rd International Conference on Life Cycle Management, University of Zurich at Irchel.

Herrmann, C., Mansour, M., Mateika, M., 2005. Strategic and operational life cycle management model, methods and activities, in: Proceedings of the 12th International CIRP Seminar on LCE 2005, Laboratoire 3S.

Kaebnick, H., Kara, S., Sun, M., 2003. Sustainable product development and manufacturing by considering environmental requirements. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 19, 461 – 468. *ice:titleĉLeadership of the Future in Manufacturingi/ce:titleĉ.*

Kindya, S., 2010. Earth week at the library end review. Website: [http://blogs.scranton.edu/library/2010/05/02/earth-week-at-the-library-endreview /](http://blogs.scranton.edu/library/2010/05/02/earth-week-at-the-library-endreview/). University of Scranton Blog.

King, P., Tester, J., 1999. The landscape of persuasive technologies. *Communications of the ACM* 42, 31–38. Krippendorff, K., 2006. The semantic turn: A new foundation for design. Taylor and Francis.

Lilley, D., 2009. Design for sustainable behaviour: strategies and perceptions. *Design Studies* 30, 704 – 720.

L'obach, B., 1976. Industrial design: Grundlagen d. Industrieproduktgestaltung. Thiemig.

Lockton, D., Harrison, D., Stanton, N.A., 2010. The design with intent method: A design tool for influencing user behaviour. *Applied Ergonomics* 41, 382 – 392. *ice:titleĉSpecial Section: Recycling centres and waste handling a workplace for employees and users.i/ce:titleĉ.*

Maxwell, D., van der Vorst, R., 2003. Developing sustainable products and services. *Journal of Cleaner Production* 11, 883 – 895. *ice:titleĉProduct Service Systems and Sustainable Consumptioni/ce:titleĉ.*

Michelini, R., Razzoli, R., 2004. Product-service eco-design: Knowledge-based infrastructures. *Journal of Cleaner Production* 12, 415 – 428.

Millet, D., Bistagnino, L., Lanzavecchia, C., Camous, R., Poldma, T., 2007. Does the potential of the use of Ica match the design team needs? *Journal of Cleaner Production* 15, 335 – 346.

Nissen, U., 1995. A methodology for the development of cleaner products: The ideal-eco-product approach. *Journal of Cleaner Production* 3, 83 – 87. European Roundtable on Cleaner Production Programs.

Norman, D.A., 2004. *Emotional Design: Why we love (or Hate) everyday things*. Basic Books.

Ornetzeder, M., Rohracher, H., 2006. User-led innovations and participation processes: lessons from sustainable energy technologies. *Energy Policy* 34, 138 – 150. *Reshaping Markets for the Benefit of Energy Saving*.

Park, P.J., Tahara, K., 2008. Quantifying producer and consumer-based eco-efficiencies for the identification of key ecodesign issues. *Journal of Cleaner Production* 16, 95 – 104.

Park, P.J., Tahara, K., Inaba, A., 2007. Product quality-based eco-efficiency applied to digital cameras. *Journal of Environmental Management* 83, 158 – 170.

Peine, A., Herrmann, A.M., 2012. The sources of use knowledge: Towards integrating the dynamics of technology use and design in the articulation of societal challenges. *Technological Forecasting and Social Change*, –.

Serna-Mansoux, L., Millet, D., Chapotot, E., Minel, S., 2012. For a sustainable dialogue: the green-use learning cycles (gulc) concept, in: 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, ESDA 2012.

Shelton, S., 2012. The mainstream blog - thou shall not mislead. Website: <http://sheltongrp.com/blog/?p=4186>.

Smith, S., Smith, G., Shen, Y.T., 2012. Redesign for product innovation. *Design Studies* 33, 160 – 184.

Vallette, T., 2005. Recherche d'un cadre conceptuel d'aide la conception collective innovante par l'usage: proposition de l'outil "Glocal" pour la conception d'outils main et des quipements de travail. Ph.D. thesis. ENSAM Paris.

Verbong, G.P., Beemsterboer, S., Sengers, F., 2012. Smart grids or smart users? involving users in developing a low carbon electricity economy. *Energy Policy*, –.

Vezzoli, C., Sciama, D., 2006. Life cycle design: from general methods to product type specific guidelines and checklists: a method adopted to develop a set of guidelines/checklist handbook for the eco-efficient design of necta vending machines. *Journal of Cleaner Production* 14, 1319 – 1325. *EcoDesign: What's happening?*.

Waage, S.A., 2007. Re-considering product design: a practical "road-map" for integration of sustainability issues. *Journal of Cleaner Production* 15, 638 – 649.

Wever, E., Kujik, J.V., Boks, C., 2008. User-centred design for sustainable behavior. *International Journal of Sustainable Engineering* 1, 9–20.

Yang, C.J., Chen, J.L., 2011. Accelerating preliminary eco-innovation design for products that integrates case-based reasoning and triz method. *Journal of Cleaner Production* 19, 998 – 1006.

Zhai, P., Williams, E.D., 2012. Analyzing consumer acceptance of photovoltaics (pv) using fuzzy logic model. *Renewable Energy* 41, 350 – 357.

Chapitre 6. Proposition d'une démarche pour l'écoconception du cycle de vie centrée utilisateur : prise en compte de l'attractivité produit-client dans le processus d'optimisation.

Ce chapitre fait l'objet d'une publication dans la revue *Journal of Industrial Ecology*. Il est ici retranscrit tel que proposé à la revue : en anglais.

Abstract

In many ecodesign problems, finding solutions that complete the design requirements while bettering multiple performances (environmental impacts, costs, etc.) is no trivial task. Design-aid tools using optimization methods are efficient to address these issues but fail to encompass the whole life cycle of products and customer attractiveness aspects. This article describes an original method using CSP optimization and QFD to generate an optimized model of a product during the early design stages. Scores from the QFD matrix are used to weight the sub objectives of the optimization so that the solving is strongly dependent on the customers' demands. As a consequence, the method allows a better integration of customer needs during the design process. To optimize multiple performances, the variables of the model are used to create impact functions corresponding to environmental impacts, costs, etc. of every life cycle phases of the product's parts. As a result, the optimized model is the one with the best performance scores while answering best the variety of customers' needs. The methodology is applied to the design of an innovative inflatable dinghy. Results show that the use of QFD generates a fewer improvement of the environmental performance compared to an environmentally focused optimization (10% vs 18%) but it guarantees that the product will better meet customers' needs. Hence, the product should more likely be accepted and purchased and have a positive impact on the performances of the whole market.

Introduction

Design requirements, in terms of functionality, costs, environmental performance, security, etc. require a great deal of complex thinking to optimally design a product (Gungor et Gupta, 1999; Mettas, 2000). During the design stages, this translates into the need of setting a great number of variables influencing the product and its life cycle. Optimization methods, first used by mathematicians and computer scientists, have been proven to be efficient tools to help designers dealing with numerous design variables simultaneously (Grossmann et al., 1999). These methods, thanks to the computing performance of the hardware used, allow exploring the whole of the design space and identifying, using algorithms for the search of optimal solutions, solutions that fulfil the requirements (Madeline, 2002). On the other hand, in the scope of an ecodesign approach, life cycle assessment (LCA) methods (Finnveden et al., 2009; Rebitzer et al., 2004) have proven insufficient to answer the various needs of designers (Millet et al., 2007; Reap et al., 2008). As a consequence, researchers such as Azapagic and Clift (1999, 1999a, 1999b) associated in various ways LCA and optimization methods to create more

efficient design-aid tools. Firstly used for the optimization of manufacturing processes (Grossmann et al., 1999), optimization methods are now used in many design problems and considering all the life cycle phases of products (Pieragostini et al., 2012).

Because they make it easy for the designer to change the values of the variables, constraints-based optimization methods are used to easily compare several design alternatives of a product (Tsang, 2014; Tchertchian et al., 2013). This easy simulation is also an important source of information for decision makers to help them compromising between environmental performance, cost, functionality, etc. (Mattson et al., 2015).

However, the existing methods fail to encompass the whole life cycle of products and customer attractiveness aspects (Pieragostini et al., 2012).

The method developed here, named EcoCSP-QFD, aims at optimizing the design of products along three axes, in order to obtain the best ratio between functionality and multi criteria performance: (i) by taking into account the whole of the life cycle (Bonou et al., 2015), (ii) by influencing the service life duration of the product, (iii) by optimizing attractiveness for customers. To demonstrate the pertinence of our method, we apply it to a design problem: the innovative inflatable dinghy case.

The second section of this paper details the problems related to ecodesign and optimization. The third section presents the EcoCSP-QFD method. The fourth section gathers the results after applying the method to the case study. The last section presents our conclusions.

Ecodesign complexity and optimization

The functions of a product, as defined in its specifications, structure the design process as well as the manufacturing stage (Pugh, 1991). It is also the functions that define a great part of the use and maintenance phases of the product (Wilberg et al., 2015). In the end, the end of life scenario of the product can depend of the residual level of its functions (Ng et al., 2014; Ziout et al., 2014). We see that a product's functionality and its evolution over time influence the whole of its life cycle. In addition, having visibility on the use and end of life phases early during the design process is useful to optimally design the product and define the best levels of functionality (Bonou et al., 2015, Serna-Mansoux et al., 2014). These relations of interdependency that exist between functionality, design process and life cycle have to be taken into account to optimize the performances of the product.

As we see, the definition of the product's functions is a crucial step that structures the following design process (Pugh, 1991). The functions that appear in the product's requirements often guide designers and engineers when making choices between several technological solutions (Sangelkar et al., 2012). As a consequence, authorizing functional negotiation during the design process (allowing designers to adjust the levels of the functions) can be a way of bettering the product's performances because of a better match of the technological solutions with the functional levels required (Lu et Al. 1997;

Tchertchian et al., 2014). The aim is for the designer not to only optimize the product design anymore but to optimize both sides of the pair: functionality and design solutions. Luttrupp (2006) states that functional negotiation can and will bring win-win situations where the environmental performance is improved while the levels of the most important functions are raised (and eventually remove the useless functions). Tchertchian et al. (2013) apply the principles of functional negotiation to the case of the design optimization of a hybrid passenger ferry. Their CSP model details the life cycle of the ferry (end of life excluded) and focuses on the use phase and on the multiple sailing modes of the ferry. The model includes variables representing functions such as the number of passengers, the ferry's speed, the number of trips, etc. The solving of the CSP shows that these variables heavily influence the design and the environmental performance of the system. For example, they calculate that commuting 109 passengers for 22 trips improves the environmental performance by 4% whereas commuting 93 passengers for 26 trips decreases it by 4.5% (taking into account that the solver gives different architectures for the ferry's design in the two cases, in accordance with the number of passengers). Even though these two cases relate to the same functional unit: 2400 passengers per day, the first solution is the best on the environmental aspect.

Determining the optimal duration of the service life (SL) of a product is a recurrent design problem (Näslund, 1966; Rostam, 1993; van Nes and Cramer, 2005; Yatsenko and Hritonenko, 2008). If the problem is seen from the impacts perspective (whether they are environmental, economic, etc.), the SL calculation will take into account the marginal impact costs and benefits of maintaining the product longer compared to the impact costs and benefits of replacing it (Kagawa et al., 2006). In other words, after a certain service time, a product may become more expensive (in terms of impacts) to maintain compared to the impact savings made if replaced by a new one (minus the impacts related to the end of life of the old product). A difficult aspect of the SL optimization is that in a business to customer model the company loses its control over the product's SL when it is sold. Indeed, the decision of throwing away the product is taken by the customer alone and depends of numerous parameters (van Nes and Cramer, 2006). As a consequence, modelling the SL can be done using more or less realistic hypothesis regarding the usage practices during the SL (for example considering that the customer will keep the product until normal wear and tear caused by the recommended usage practices put it out of order).

An ecodesign strategy cannot limit itself to reducing environmental impacts without considering attractiveness for the customers. It is indeed poorly profitable, on the economic side as well as on the environmental side, to heavily invest to better a product's performances if it does not generate sufficient sales (Hayes, 1998). An optimization method for ecodesign must not only influence environmental aspects but also the key functions that are preponderant in the attractiveness for customers. Quality Function Deployment (QFD) (Ada, 1998; Akao, 2004) was created to include customers' demands in the design process by defining and prioritizing their interrelations with the product's specifications. Since then QFD has been modified to be more adapted to ecodesign

problems. Zhang (1999) proposed a method called Green-QFD that integrates life cycle principles to optimize the environmental performance of the manufacturing phase of products. Later, Masui et al. (2001) developed the QFD for Environment (QFDE) method by incorporating environmental aspects into QFD.

Existing optimization methods for ecodesign

The method proposed in this paper, associating environmental performance and optimization, can be seen as an evolution of parametric LCA (Eisenhard et al., 2000). Parametric LCA is a tool that allows assessing the environmental performance of a system for which some design variables are not fixed. However, this type of LCA is only efficient to take into account a small number of design variables (Sousa et al., 2000). Works aiming at including LCA tools into computer-aided design software should reduce this issue in the future (Ostad-Ahmad-Ghorabi et al., 2009).

Among the methods used by designers, the approach using Design of Experiments (DoE) is the closest to the approach using CSP (Tchertchian et al., 2013). Indeed, using DoE during the design process consists in modelling the product with numeric variables (Millet et al., 2009). However, contrary to the approach using CSP, the approach using DoE doesn't allow exploring the whole of the design space. It is limited to a smaller number of combinations simulated using specific methods (Taguchi et al., 1989). As a consequence, there is a risk of passing by potentially good solutions without noticing them as they would be in an unexplored area of the design space.

Pieragostini et al. (2012) inventoried in 2012 fifteen methodologies associating LCA and optimization methods. However, they didn't identify any generic method applied to product ecodesign and taking into account the whole life cycle of the products. In 2013, Tchertchian et al. (2013) showed the benefits of a LCA-CSP-based approach for the ecodesign of complex systems. Gomes et al. (2009) proposed a method based on a CSP approach for optimizing product models taking into account functionality. The efficiency of CSP approaches has also been demonstrated for the modelling of the use phase of products (Yannou et al., 2010).

From a wider point of view, ecodesign problems require setting an important number of design variables. These problems often count several circular dependencies between variables and can be tricky to solve (Yannou et al., 2010). Constraints propagation techniques as well as intervals reduction techniques used for solving CSP problems are efficient to deal with these issues (Davis, 1987). For all those reasons, CSP-based approaches seem pertinent in the scope of a methodology aiming at ecodesigning products and their life cycles

The EcoCSP-QFD method

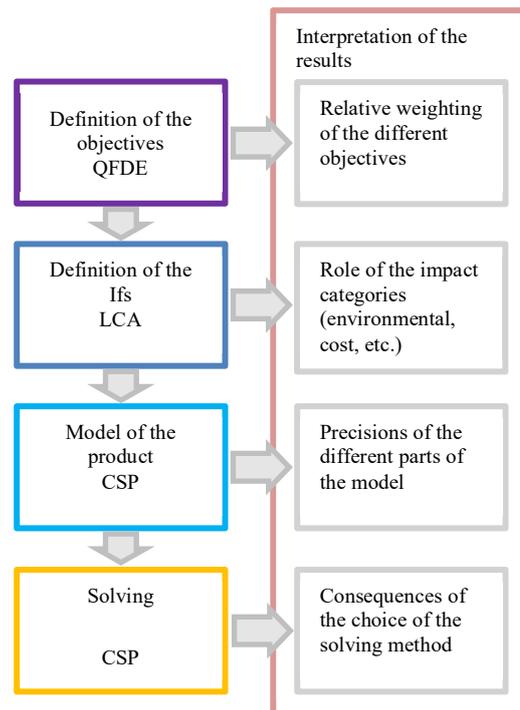


Fig. 44. The EcoCSP-QFD method

Introduction: description and context

Our method aims at optimizing the design of products in order to obtain the best ratio between functionality and multi criteria performance. It is suited to be applied to the preliminary design and detailed design phases of the design process (Ertas and Jones, 1996). The method requires the skills of the whole of the design team to develop a precise model of the product.

Using QFDE to describe the problem

In the ecoCSP-QFD method, we use QFD techniques to describe the problem and identify the constraints and objective that we will use in the CSP model. A traditional QFD approach is applied to the design problem. The ecoCSP-QFD method intervenes when defining and ranking the design and parts characteristics. The aim is to use the design characteristics (from the phase 1 matrix) and the parts characteristics (from the phase 2 matrix) as variables or expressions of the CSP model that will be built later. The definition of goals (in the bottom part of the matrix) for each design characteristic and each part characteristic will be translated into constraints and sub-objectives in the CSP model.

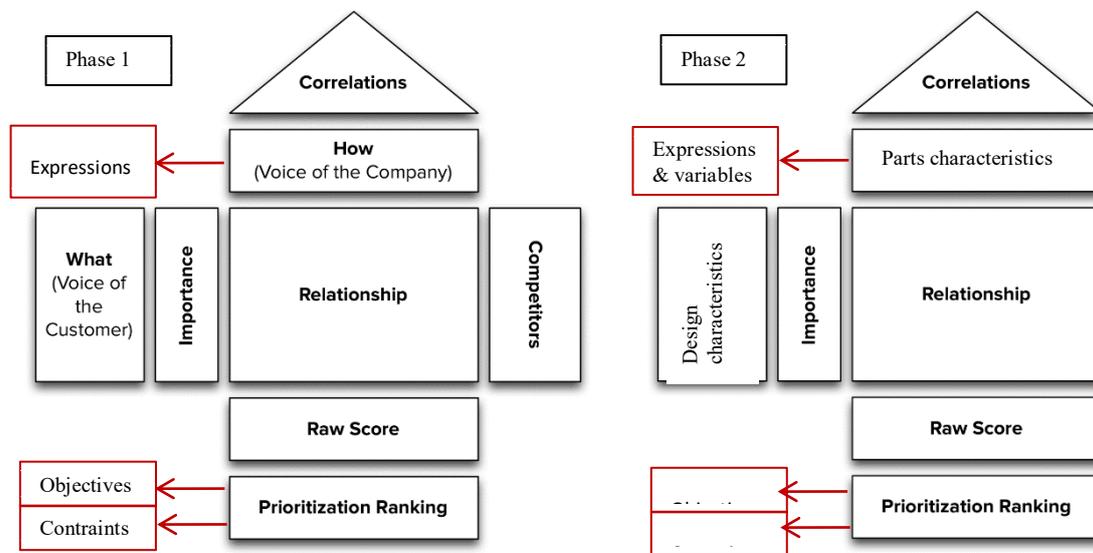


Fig. 45. Phases 1 & 2 matrix from the QFD technic and their use for the CSP model

As every design and part characteristic is not necessarily easy to model, choices may have to be made regarding which characteristic has to be included in the model or not. To do so, the scores calculated for each characteristic can be used. The design team may chose to only keep the characteristics that represent a given percentage of the total score for example. Depending on their score, some characteristics may also be modelled more or less precisely in the CSP. The ones with the highest scores justify a greater amount of work since they have a high impact on the whole of the system.

The CSP model

The next step of the EcoCSP-QFD method is modelling the product/system considered (Diagne et al., 2015; Joore and Brezet, 2015; Yvars et al., 2009). CSP models use a set of variables X such as lengths, surfaces, masses, etc. To each one of these variables X_i is attributed a domain D_i which represents the range of its possible values. Variables are linked to one another by mathematical functions called constraints C . Altogether, variables, domains and constraints shape a mathematical representation of the real product including all the design solutions. The model is not limited to the product itself; Yannou et al. (2010) include to their model variables related to the users (gender, level of skill...) that influence the product design. Hence, the system considered can take into account the product itself, its users and every other system that has interaction with the product. Solving a CSP means: for each variable finding a value, inside its domain, so that all the constraints are verified. A solving objective can also be defined (for example minimizing the mass of the system). In this case there is only one optimal solution. The equation 3 below shows a simplified representation of a CSP model.

$$CSP Model = \begin{cases} X = \{X_1; \dots; X_n\} \\ D = \{D_1; \dots; D_n\} \\ C = \{C_1; \dots; C_p\} \end{cases} + \text{solving objective}$$

Eq. 3. Representation of a CSP model

It is possible to constrain more or less the model depending on the amount of data available or depending on the results wanted. The lesser constrained the model is, the lesser the solutions will be precise but the more the design space will be explored. It can be interesting sometimes to voluntarily under constrain the model so that it may not only focus on foreseen solutions.

Impact Functions

The main objective of our method is to reduce the impacts of the product throughout the whole of its life cycle. To do so, it is necessary to know the impact values of the product (and of its parts) for each phase of its life cycle. We create for each part and each life cycle phase an Impact Function (IF) that models the value of a chosen impact. IFs can represent environmental, economic, social impacts, etc. for each part of the product and for each life cycle phase. In CSP terms, IFs are expressions: mathematical functions using the variables of the model. They also use impact coefficients (extracted from a LCA software in the case of environmental impacts) that allow calculating an impact score. For example, the environmental IF of the manufacturing phase of a part made of PVC fabric will use the variables that allow expressing the mass of the part and a coefficient that gives a value per mass unit for the chosen environmental impact category. When solving the problem, optimizing the environmental impact scores will translate into finding the values for the design variables to minimize the score. The result will be the precise setting of all the design variables that optimize the impact scores.

The same principles apply to the end of life and transport phases where process quantities and materials quantities can be multiplied with impact coefficients to give the wanted impact scores. The use phase, however, may be trickier to take into consideration because it often causes delayed impacts that are hard to model (Popoff et al., 2016). We will not go into detail concerning the model of the use phase in this paper.

Solving objective

In CSP terms, an objective is an expression that has to be minimized or maximized when solving the problem. Only one objective can be taken into account by solvers. If several variables or expressions need to be maximized or minimized, they have to be combined in a global objective. Equation 4 shows a manner of simultaneously minimize an expression A while maximizing another expression B. Parameters (contrary to variables, the values of the parameters stay fixed during the solving) x and y can be used to normalize the values of the sub-objectives and/or to prioritize one sub-objective ahead of the others.

$$\text{Objective} = \text{Minimize}(xA - yB + \dots)$$

Eq. 4 Combination of multiple sub-objectives to shape a global objective

The choice of the values of the parameters has a direct influence on the results of the optimization. They have to be set according to a coherent procedure regarding the product's specifications. Moreover, an ecodesign strategy, integrated into the business strategy of a company, cannot limit itself to the reduction of impacts without considering the consequences for the customer attractiveness. Hence, the solving objective must not only include environmental, economic, etc. impact functions but also all the other expressions of the aspects that are important for the customers (mass of a product, autonomy, service life duration, etc.). In a classical design approach, dealing with several opposite objectives of various nature is not easily done. Techniques are required to quantify these objectives and make appropriate compromises.

In the ecoCSP-QFD method, to define the sub-objectives and their relative weighting, we use the matrix from phase one and two of the QFDE method proposed by Masui (2003). The global optimization objective is then a combination of sub-objectives: expressions and variables representing the design and parts characteristics from the QFDE matrix. These expressions are weighted accordingly to the scores calculated for each requirement in the matrix. By doing so, the solving of the CSP is done considering sub-objectives prioritized according to their relative importance for the customers. The solutions obtained with this method should then be the ones that suit best the company specifications as well as the customers' demands.

Solving the CSP

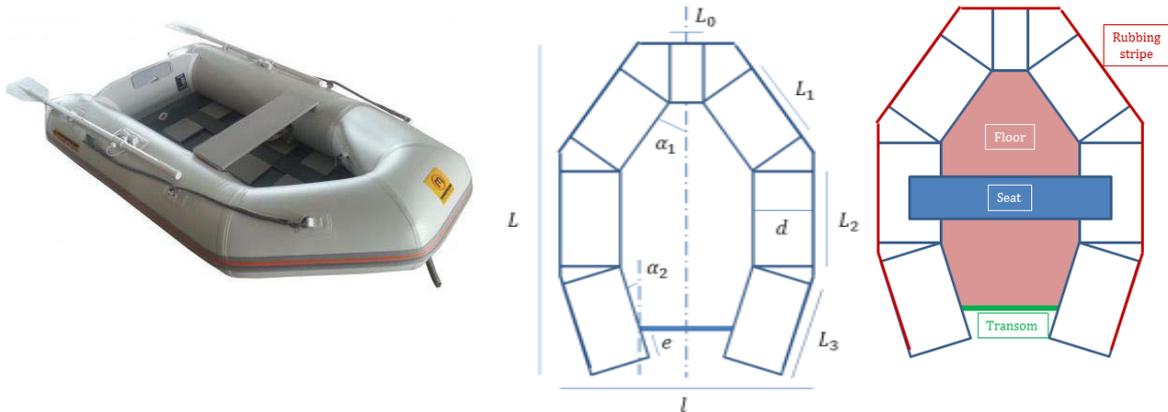
Solving a CSP problem means: for each variable of X to find a value inside its domain that satisfies the set of constraints C. If an objective has been defined, the whole space is explored until the best solution is found.

Several techniques have been designed to solve CSP problems. We will not go here into that kind of detail and will only use the technique(s) available within the software used for the case study.

Results

Case study

Our case study is an innovative inflatable dinghy (see figure 46). The main parts of the dinghy are the structure (tube and floor) made of PE-PVC fabric, the transom, the wooden floor, the seat and the rubbing stripe (see figure 48).



From left to right: Fig. 46. Picture of the dinghy. Fig. 47. Architectural variables. Fig. 48. Parts included in the optimization

Application of the EcoCSP-QFD method

The first phase of the EcoCSP-QFD method is to perform an analysis of the design problem using the QFDE technique. To do so, a team grouping expert ecodesign researchers and staff from the company manufacturing the dinghy was gathered. The staff from the company included designers, engineers and the marketing chief. The client point of view was represented by employees that had heavy sailing background.

Two work sessions of two hours each were necessary to complete the first QFDE matrix. The first task was to identify the list of client requirements relative to the product. This was achieved using brainstorming techniques and adopting several « client » points of view. In this exercise, we did not only considered the point of view of the customer but also the point of view of the environment as a client input.

After establishing the list of client requirements, the participants were asked to give each of them three scores: one for the client importance, one for the competitive importance and one for the strategic importance. The scores were established using no specific technique. However, a protocol for introducing AHP as well as the Kano model was ready if there was difficulty scoring some requirements. Regarding the competitive importance, the scoring was made relatively to the scores of three concurrent products that were studied before the worksession. It was also made relatively to the scores of the actual product manufactured by the company.

The design requirements were established by asking « how can the product fulfil the client requirements? ». They were established with a focus on the need to model them inside the CSP model. As a consequence, they were all expressed in a way that made their modeling possible. For some design requirements proposed, the modeling required a great amount of work although their global

importance was low. Such requirements were removed from the matrix to simplify the CSP model. It was for example the case with the design requirement « Drag coefficient » which required the inclusion of complex formulas and the need of several experiments but did not have a strong importance for the performances of the product.

In the center of the matrix, the correlations between the client and the design requirements were completed using a 1-3-9 scale, 9 being the best score possible. No particular technique was used to establish these correlations.

Finally, in the bottom part of the matrix, a goal was attributed to each design requirement. Here, as it is the CSP solver that will calculate the optimal values for each design requirement, the value « Opti. » was displayed in each cell. The values for these requirements were measured or calculated for the actual product to give a reference for comparison once the results from the solver are available. The same measurements and calculations were made for the three concurrent products for the results to be compared with.

After sketching the second QFDE matrix, it was decided that the level of detail given by the first matrix was sufficient to give useful results to the company. The second matrix concerned part requirements too time consuming to model relatively to their low global importance.

Design requirements		Inner surface	Volume of the float	Weight	Thickness of the fabric	Physical lifetime	Environmental performance	Cost	Customer importance	Actual product	Goals	Improvement factor	Sales points	Overall weighting	Percentage
		?	?	↓	↑	=	↑	=							
Client Requirements	Comfort	Easy to move		9					8	1	9	1,8	1,4	20	18%
		Easy to store	1	1					5	3	8	1,5	1,3	9,8	9%
		Comfortable	9	1					7	6	7	1,1	1,1	8,5	7%
		Quick to inflate		9					7	5	7	1,2	1,2	10	9%
	Performance	Efficient sailing			3				4	4	4	1	1,1	4,4	4%
		Long lifetime				9	9		8	8	8	1	1,2	9,6	8%
		Robust (abrasion)				9			8	8	8	1	1,2	9,6	8%
		Low eco footprint				3	3	9	5	5	9	1,4	1,4	9,8	9%
	Affordable							9	8	6	7	1,1	1,4	12	11%
	Esthetic		3						6	5	6	1,1	1,2	7,9	7%
	Safe	3	9		3	1			10	10	10	1	1,2	12	11%
	TECHNICAL PRIORITIES		122	241	195	238	128	88	111						
Percentage		11%	21%	17%	21%	11%	8%	10%							
Actual product		0,9 m ²	0,13 m ²	26 kg	1.1 mm	15 yr	32 pts	650 €							
Targets		Opti.	Opti.	Opti.	Opti.	Opti.	Opti.	Opti.							

Fig. 49. Matrix phase 1 of the QFDE technique for the case of the inflatable dinghy

In the second phase of the EocCSP-QFD method, the main goal of the CSP model is to allow calculating optimal values for the design requirements chosen in the QFDE matrix. However, the model must not only include a representation of the design requirements but also a representation of the physical reality of the product. This means all the elements that have a play in the integrity and viability of the product and its life cycle.

On the mechanical design side, we established the model that describes the dinghy considering a realistic architecture (see figure 47). The architecture represents the structure of the float, floor and rear panel. It is what gives the dinghy its floating performance and safety. Without modelling these elements, there is no product. We also include in the model the parts that are affected by modifications of the architecture of the dinghy (figure 48). This concerns the seat, which depends on the width of

the dinghy, the floor mat and the rubbing stripe which acts as an external protection of the float. Some of the variables related to the product's architecture can be seen in figure 47. The domains of the variables are defined after discussion with the design team. We do not include in the model parts that are not affected by the optimization of the architecture (handles, ropes, etc.). Modelling the architecture of the dinghy encompasses the first four design requirements defined with the QFDE study: the inner surface, the volume of the float and the weight of the dinghy.

For this part of the model, the majority of the constraints are extracted from official European documents concerning design norms for this type of products: the Division 240 "Recreational boats" and the EN ISO 6185-1.

Table 10

List of constraints included in the model of the dinghy

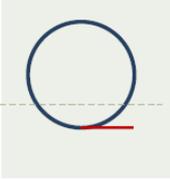
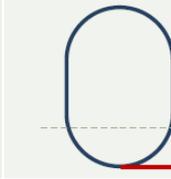
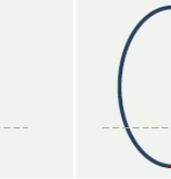
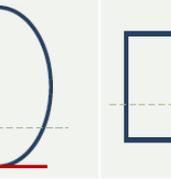
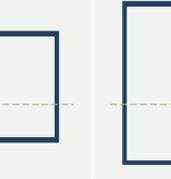
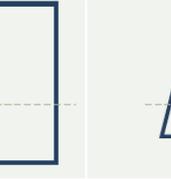
Constraints	Floating value	$\rho_w \times V_{total} \times g \geq 1800$
	Number of seats	$n \leq \frac{(L - d - e)}{0.38} - 1$
	Bow angle	$\alpha_1 \in [15^\circ; 60^\circ]$
	Stern angle	$\alpha_2 \in [0^\circ; 60^\circ]$
	Cargo	$m_{Max} \leq 0.75 \times \rho_w \cdot V_f - m_a$ $m_{Max} > n \times 75$
	Lowest point under water	$z \leq h_f/3$
	Volumes of the N compartments of the tube	$\forall \text{Compartment} \in \text{Tube};$ $V_{compartment} \in \left[0.8 \times \frac{V_f}{N}; 1.2 \times \frac{V_f}{N}\right]$
	Highest point above water when fully loaded	$m_a + n \times 75 = \rho_w \cdot (L_f \cdot S_{fz2} + z_2 \cdot S_s)$
Expressions	Buoyant force	$m_a + n \times 75 = \rho_w \cdot (L_f \cdot S_{fz} + z \cdot S_s)$
	Total volume	$V_{total} = \frac{L_f}{2} (l_f \cdot h_f + s_f) + h_f \cdot S_s$
	Surface of fabric needed	$S_{total} = p_f \cdot L_f + S_s$
	Mass of the dinghy	$m_a = S_{totale} \times m_s + \sum_{i=0}^k m_i$ avec m_i la masse de l'accessoire i
	Length of the dinghy	$L = L_1 \cdot \cos \alpha_1 + L_2 + L_3 \cdot \cos \alpha_2 + l_f \cdot \sin \alpha_2 + l_f$
	Width of the dinghy	$l = 2 \times (l_f + L_1 \cdot \sin \alpha_1) + L_0$
	Length of the tube	$L_F = 2 \times \left(\frac{L_0}{2} + L_1 + L_2 + L_3 \right. \\ \left. + l_f \cdot \left(\tan \frac{\alpha_1}{2} + \tan \frac{\alpha_2}{2} + \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha_1}{2} \right) \right) \right)$

Floor surface	$S_s = (L_1 \cos \alpha_1) \times (L_0 + L_1 \sin \alpha_1) + L_2 \times (L_0 + 2 \times L_1 \sin \alpha_1) + (L_3 - e) \cos \alpha_2 \times (L_0 + 2 L_1 \sin \alpha_1 - (L_3 - e) \sin \alpha_2)$
---------------	---

As it is technically feasible, we proposed several geometrics for the design of the float. Each one was included in the model for the solver to chose the one giving the best performances to the dinghy.

Table 11

Several feasible geometrics for the float.

					
$p_f = \pi \cdot l_f + \frac{l_f}{2} + c$ $s_f = \pi \cdot \frac{l_f^2}{4}$ $l_f = h_f$ $s_{fz} = \frac{d^2}{8} \cdot (\theta_1 - \sin \theta_1)$	$p_f = \pi \cdot l_f + 2 \cdot (h_f - l_f) + \frac{l_f}{2} + c$ $s_f = l_f \cdot \left(h_f + \frac{\pi - 4}{4} \cdot l_f \right)$ $l_f \leq h_f$ $s_{fz} = l_f \cdot \left(z \cdot h_f + \frac{\pi - 4}{4} \cdot \frac{l_f}{2} \right)$	$p_f = 2\pi \sqrt{\frac{l_f^2 + h_f^2}{2}} + \frac{l_f}{2} + c$ $s_f = \pi \cdot l_f \cdot h_f$	$p_f = 2 \cdot (l_f + h_f) + c$ $s_f = l_f \cdot h_f$ $l_f = h_f$ $s_{fz} = z \cdot l_f \cdot h_f$	$p_f = 2 \cdot (l_f + h_f) + c$ $s_f = l_f \cdot h_f$ $s_{fz} = z \cdot l_f \cdot h_f$	$p_f = l_f + l_r$ $+ 2 \sqrt{h_f^2 + \left(\frac{1}{2}(l_f - l_r) \right)^2} + c$ $s_f = \frac{1}{2} (l_f + l_r) \cdot h_f$ $s_{fz} = \frac{z}{2} \cdot (s_f + l_f \cdot h_f)$ $l_r \leq l_f$

The model includes the accessories for which dimensions vary with the dimensions of the dinghy: the transom, the floor, the seat and the rubbing stripe. These accessories are visible on figure 48. For each one of them we express its mass or volume (see table 10), depending on which one of these variables will be used by the IFs.

Table 12

Expressions of masses and volumes of the accessories

$m_{floor} = (2 \cdot S_s + h_p \cdot p_s) \times M_{floor}$
$V_{transom} = h_f \cdot e_t \cdot (L_0 + 2L_1 \sin \alpha_1 - 2(L_3 - e) \sin \alpha_2)$
$m_{holders} = 2 \times h_f \times \frac{0.223}{0.420}$
$V_{seat} = h_s \cdot l_s \cdot (L_0 + 2L_1 \sin \alpha_1 + l_f)$
$m_{rubbing} = 2 \times \frac{0.625}{4.80} \times \left(\frac{L_0}{2} + L_1 + L_2 + L_3 + 2 \cdot l_f \cdot \left(\tan \frac{\alpha_1}{2} + \tan \frac{\alpha_2}{2} + \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha_1}{2} \right) \right) \right)$

The impacts from the manufacturing processes are taken into account with the impact coefficients of each part (when the impact coefficient is multiplied with the mass/volume of the part, it gives the value of the impact score).

The model takes into account the assembly of the parts. Most of them are glued together by hand in a Chinese factory. The quantities of glue and work vary depending on the dimensions of the dinghy and of its parts. It is thus necessary for the gluing operation to be modelled in the CSP. We express the impacts of this operation as functions of the total glued surface (making the hypothesis that the same amount of glue per surface is used for all the assembly: 300 g/m²). The values of the glued surfaces are expressed in the table 13 below.



Fig. 50. How the glued parts are assembled

Table 13

Expressions of the glued surfaces

Parts	Glued surface	Amount
Closing the tube	$L_f \times (a + b)$	1
Tube segment – tube segment	$p_f \times 2b$	14
Tube - floor	$(L_f - 2e) \times (a + b)$	1
Rubbing stripe - tube	$L_f \times h_{bdr}$	1
Rubbing stripe - floor	$(L_A - e) \times h_{bdr}$	1
Floor - transom	$L_T \times 2b$	1
Tube – transom holders	$p_f \times b$	2
Tube – seat holders	$l_{siège} \times 2b$	2

The next two design requirements that have to be modeled are the thickness of the fabric and the service life of the product. The first one will be of crucial importance during the optimization process because of its correlation with the weight of the product. For the second one, we consider a simplified model: we make the hypothesis that the service life is only function of the thickness of the PE-PVC fabric. The more the fabric is thick, the more the product will last. We use as a reference the fabric already used on existing dinghies: with a thickness of 1.1 mm, it allows an average SL of 15 years. Innovative thinner fabrics have been developed: down to 0.45 mm, estimations made by the manufacturer state that it should provide a SL around 5 years. With the hypothesis that the relation between fabric thickness (e_{fabric}) and SL is linear, we obtain the following equation 5.

$$SL = 15.38 e_{\text{fabric}} - 1.91$$

Eq. 5 Expression of the SL function of the fabric thickness

The preliminary QFDE study gave priority to two types of performance indicators: the environmental performance (divided into four subcategories: Climate Change, Ecosystem Quality, Human Health and Ressources) and the costs. IFs are defined for each part of the dinghy and for each life cycle phases. Table 14 gathers the impact coefficients which will be multiplied with the expressions of masses or volumes of the parts to obtain the impact scores of the manufacturing phase (note that in tables 14 and 15 the four environmental subcategories are aggregated in a single score so that the tables are easier to read).

Table 14
Impact coefficients per mass/volume related to the manufacturing phase

Part	Material	Coef. EI	Coef. cost
Structure	PE-PVC	0.90 pts.kg ⁻¹	8.00 €.kg ⁻¹
Wooden floor	Plywood	0.25 pts.dm ⁻³	3.00 €.dm ⁻³
Transom	Plywood	0.25 pts.dm ⁻³	3.00 €.dm ⁻³
Transom holder	PVC	0.44 pts.kg ⁻¹	2.00 €.kg ⁻¹
Seat	Plywood	0.25 pts.dm ⁻³	3.00 €.dm ⁻³
Rubbing stripe	PVC	0.44 pts.kg ⁻¹	2.00 €.kg ⁻¹

Table 15 gathers the expressions and the impact coefficients that, multiplied together, will give the impact scores of the other life cycle phases of the dinghy (to simplify the case here, the use and maintenance phase is not taken into account).

Table 15
Impact coefficients and expressions for the calculation of the impact scores of the life cycle of the dinghy (manufacturing of materials excluded)

Operation	Expression	Coef. EI	Coef. cost	
Assembly	Glued surface	0.10 pts.m ⁻²	3.00 €.m ⁻²	
Transport	Cargo	Mass	1.42E -06 pts.kg ⁻¹ .km ⁻¹	0.01E -04 €.kg ⁻¹ .km ⁻¹
	Train	Mass	5.63E -06 pts.kg ⁻¹ .km ⁻¹	0.39E -04 €.kg ⁻¹ .km ⁻¹
	Camion	Mass	0.02E -03 pts.kg ⁻¹ .km ⁻¹	0.60E -04 €.kg ⁻¹ .km ⁻¹
Disassembly	Glued surface	0.15 pts.h ⁻¹	15.0 €.h ⁻¹	
PVC recycling	Mass of PVC	0.08 pts.kg ⁻¹	10.0 €.kg ⁻¹	
Steel recycling	Mass of steel	0.07 pts.kg ⁻¹	5 €.kg ⁻¹	
Incineration	Mass of other materials	0.11 pts.kg ⁻¹	3 €.kg ⁻¹	

Our goal is to minimize environmental impacts and costs while guaranteeing sufficient customer attractiveness. To identify and prioritize the sub-objectives, we use the matrix from the first step of the QFDE method.

The seven design requirements that have been modelled are the following: the floor surface, the float volume, the fabric thickness, the service life, the weight, the environmental impacts and the costs. These requirements are the seven sub-objectives of the optimization. We weight them using the scores of technical priority extracted from the QFDE matrix. The weighted sum of the seven sub-objectives is the global objective of the solving. Since the objective function of an optimisation problem is an expression that has to be either minimized or maximized, it has to be determined which sub-objectives are to be minimized and which are to be maximized:

- The floor surface has to be maximized to guarantee sufficient comfort to the users
- The volume of the tube has to be sufficient to respect the norms but also minimized to use less materials
- The mass of the dinghy has to be minimized
- The fabric thickness has to be minimized to use less materials but has to be strong enough to allow a decent service life
- The service life has to be maximized
- The environmental impacts have to be minimized
- The costs have to be minimized

These minimizations and maximizations are not absolute. They are relative to the scores calculated in the bottom part of the QFDE matrix. We can see the global objective, weighted combinaison of the seven sub-objectives, in the equation 25 below.

$$\text{Objective} = \text{Minimize}(-122 S_f + 241 V_t + 195 m_D + 238 e - 128 SL + 88 EI + 111 C)$$

Eq. 6 Expression of the global QFDE objective

Where S_f is the floor surface, V_t the volume of the tube (or float), m_D the total mass of the dinghy, e the thickness of the fabric, SL the Service Life, EI the score of the environmental impacts (sum of the four subcategories) and C the score of the cost impact.

The solving is done using a solver software. In our work we used Microsoft Visual Studio for coding the problem in C++ and the Ilog Solver library for the solving.

We modelled a four passenger dinghy. In addition to the global objective defined previously, we also solved the problem using intuitive objectives so that the results can be compared. Two intuitive objectives were defined: *minimize the environmental impacts* and *minimize the cost*. All the results are compared to the data from the existing dinghy. They are visible in the table 16 below.

Table 16
Results of the optimizations with three different objectives

	Unit	Actual	Opti.	Opti.	Opti.	
		dinghy	QFDE	EI only	Cost only	
Scores	Service life	years	15	11	5	5
	Climate change	pts	1.12	0.91	0.81	0.81
	Ecosystem quality	pts	0.25	0.2	0.2	0.2
	Human health	pts	2.77	2.74	2.45	2.45
	Ressources	pts	0.95	0.98	0.88	0.88
	Cost	pts	3.21	2.71	2.45	2.45
	Total mass	kg	29.52	23.9	21.3	21.41
	Mass of the fabric	kg	13.30	13.8	11.3	11.27
	Total length	cm	270	267	256	255
	Total width	cm	172	178	166	168
Dimensions	Tube diameter	cm	45	38	46	46
	Length of the tube	cm	584	574	536	534
	Floor Surface	m ²	1.76	1.96	1.26	1.27
	Total volume	m ³	1.81	1.48	1.59	1.59
	Bow angle	deg.	21	43	40	40
	Stern angle	deg.	0	10	10	10
	Length of L0	cm	10	12	10	10
	Length of L1	cm	62	66	50	50
	Length of L2	cm	155	119	90	93
	Length of L3	cm	0	61	81	77
Length of the Transom	cm	64	84	50	51	

We see that the optimization made with the objective defined using the QFDE matrix does not give the best environmental and cost scores. This is understandable as it includes sub-objectives such as “increasing floor surface” and “increasing SL” that both tend to use more materials for the design of the dinghy, thus generating more impacts. However, the QFDE objective still causes a good reduction of the mass, which is an important point for the customers. The two objectives “Environmental Impacts only” and “Cost only” give similar results. This shows that, for the case of the inflatable dinghy, the environmental impacts and costs are linked to one another. They are in fact function of the masses and volumes of materials used. As a consequence, the solver uses the same ways to minimize both of them.

It has to be noted that the QFDE matrix used to design the objective was elaborated within our research team. Another team would probably come up with a different matrix and thus with a different solving objective. As a consequence, it appears necessary to assess the robustness of our method by performing a sensitivity analysis on the solving objective. To do so, several changes are made to the QFDE matrix and the consequences on the results are monitored.

The following table gathers a list of new objectives obtained after removing the corresponding line from the client requirements of the QFDE matrix.

Table 17
Sensitivity analysis on the solving objective

Requirement removed		New objective expression obtained	
Client Requirements	Comfort	Easy to move	$- 122 Sf + 241 Vt + 13 mD + 238 e - 128 SL + 88 EI + 111 C$
		Easy to store	$- 112 Sf + 231 Vt + 195 mD + 238 e - 128 SL + 88 EI + 111 C$
		Comfortable	$- 46 Sf + 232 Vt + 195 mD + 238 e - 128 SL + 88 EI + 111 C$
	Perf.	Quick to inflate	$- 122 Sf + 150 Vt + 195 mD + 238 e - 128 SL + 88 EI + 111 C$
		Efficient sailing	$- 122 Sf + 241 Vt + 181 mD + 238 e - 128 SL + 88 EI + 111 C$
		Long lifetime	$- 122 Sf + 241 Vt + 195 mD + 152 e - 41 SL + 88 EI + 111 C$
	Env	Robust (abrasion)	$- 122 Sf + 241 Vt + 195 mD + 152 e - 128 SL + 88 EI + 111 C$
		Low eco footprint	$- 122 Sf + 241 Vt + 195 mD + 209 e - 98 SL + 0 EI + 111 C$
		Affordable	$- 122 Sf + 241 Vt + 195 mD + 238 e - 128 SL + 88 EI + 0 C$
		Esthetic	$- 122 Sf + 217 Vt + 195 mD + 238 e - 128 SL + 88 EI + 111 C$
		Safe	$- 86 Sf + 133 Vt + 195 mD + 202 e - 116 SL + 88 EI + 111 C$

We also designed a solving objective after removing the improvement factor and the sales point factor of the QFDE matrix. The equation obtained is as follows: $Objective = minimize(- 98 Sf + 183 Vt + 84 mD + 189 e - 97 SL + 45 EI + 72 C)$.

Table 18
Consequences of the sensitivity analysis of the solving objective on the results

	Service Life (years)	Climate change (points)	Ecosystem quality (points)	Human health (points)	Resource (points)	Cost (points)	Mass of the dinghy (kg)	Sum of relative dev. *
No line removed	11,00	0,91	0,20	2,74	0,98	2,71	23,98	0
Easy to move	12,43	0,96	0,19	3,01	1,09	3,01	22,54	0,62
Easy to store	10,78	0,88	0,22	2,88	1,08	3,01	24,7	0,45

Comfortable	10,56	0,92	0,19	2,96	0,94	2,6	27,58	0,41
Quick to inflate	10,01	0,88	0,2	3,01	0,86	2,76	20,86	0,49
Efficient sailing	10,56	0,78	0,22	3,01	0,92	2,57	20,38	0,64
Long lifetime	11,66	0,78	0,23	2,58	0,99	2,44	27,1	0,65
Robust (abrasion)	9,79	0,89	0,18	2,49	0,91	2,87	27,1	0,58
Low eco footprint	11,22	0,97	0,18	2,82	1,1	2,95	20,62	0,57
Affordable	11,55	0,9	0,21	3,1	1	3,09	26,86	0,52
Esthetic	10,67	1,05	0,22	2,82	0,88	2,71	25,9	0,50
Safe	11,22	0,92	0,18	3,12	0,88	2,82	22,3	0,48
New planning factors	10,01	1,05	0,17	3,15	1,13	2,6	20,86	0,87
Average	10,97 (-1%)**	0,90 (-1%)	0,20 (0%)	2,83 (3%)	0,99 (1%)	2,81 (3%)	24,06 (0%)	
Standard deviation	0,77 (6%)*	0,08 (9%)	0,02 (9%)	0,26 (9%)	0,09 (9%)	0,19 (6%)	2,81 (11%)	
Max. deviation	1,43 (13%)**	0,14 (15%)	0,03 (15%)	0,41 (15%)	0,15 (15%)	0,38 (14%)	3,60 (15%)	

*In the last column of table 18, the sum of deviations is calculated from the absolute values of the relative deviations between the values of the corresponding line with the values of the first line. It shows for which line the results differ the most from the QFDE objective results.

**In the three last lines of table 18, the relative values are calculated according to the values of the first line labeled "No line removed".

The sensitivity analysis shows that the results do not deviate more than 15% for each score when the QFDE matrix is modified. The standard deviations are between 6 and 11%, showing that the results are grouped on a small area of the design space. The results that deviate the most from the initial results are those from the last line of table 18 (labeled "New planning factors"). This shows the importance of the techniques used to design the planning matrix for the pertinence of the solution found to the design problem.

Discussion

The method developed in this paper is based on constraint modelling of products. We chose as a first approach to only take into consideration the impacts related to the masses and volumes of materials. The determination of the values of the impact scores is thus close to LCA methods. We didn't explore

the possibility of considering other types of indicators (recyclability ratio, water footprint, eco footprint, etc.).

It is important to underline that, with our method, the results depend directly on the choice of the impact categories and on their weighting. It is crucial for the designers to have a prior knowledge of the objectives to conduct a pertinent optimization.

The product's model was here made using integer variables. The precision of the dimensional variables was the centimeter. This choice is justified by the fact that the inflatable dinghy has a slightly flexible structure that undergoes important deformations when used. From the user's point of view, milimetric differentiation is irrelevant. From the designer's point of view, it implies too much computing time. The same problem described with floating variables would be, if not impossible, excessively long to solve (Michel et al., 2001).

Choosing the solving method is also important to achieve a fast solving (Lebbah and Lhomme, 2002). Numerous specialized methods for constraint propagation and intervals reduction have been developed to solve CSP problems (Davis, 1987; Falting, 1994; Mackworth, 1977). Identifying the best techniques for solving ecodesign problems would be crucial to improve the efficiency of the optimization.

Modelling and solving a design problem to find its optimal solution can be tricky since both the model and the solving depend on the choices made by the design team. With another team, the model would probably be different and so would be the solution. As a consequence, the optimal solution found is only optimal within the frame established by the design team. To evaluate the robustness of the solution found, we chose to perform a sensitivity analysis on the solving objective

Conclusions and perspectives

In this paper, we developed and tested a design-aid method based on a CSP approach for the optimization of the performance of products. We showed that our method allows studying consequences of variations of the design variables' values on the multi performance on the product's life cycle. It allows comparing several design alternatives and finding the best solution inside the design space. In this last case, the optimization is done taking into account objectives defined by the design team. For our inflatable dinghy case study, the method gave positive results. We saw that the results were robust since the sensitivity analysis on the solving objective gave a set of solutions gathered in the same area of the design space. We also saw that the objective defined using the EcoCSP-QFD method did not give the best environmental performance. This is understandable as responding to customers' needs may require compromises regarding the performances and profitability of the product. However, it is clear that integrating customers' demands when ecodesigning a product is of crucial importance. This way the product may not be seen only as an environmentally friendly one but as a globally optimized one. It is then more likely to be accepted and purchased. Several points still

need to be enlightened to guarantee the efficiency of our method. One is the modelling and solving strategy. Depending on the product, the model can become excessively complex and require a lot of work and computing time to be solved. It may be better to opt for a simpler model with fewer variables, smaller domains and/or more constraints. This can also be done by progressively fixing several variables of a complex model after conducting several preliminary solving (in this case a strategy has to be developed to choose which variables to fix first). Finally, it is necessary to apply the method to a variety of case studies to assess its polyvalence.

References

- Ada, L.Z.C., 1998. Quality Function Deployment. MECHANICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY.
- Akao, Y., 2004. Quality function deployment.
- Azapagic, A., 1999. Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation. *Chemical engineering journal* 73, 1–21.
- Azapagic, A., Clift, R., 1999. Life cycle assessment and multiobjective optimisation. *Journal of Cleaner Production* 7, 135–143.
- Azapagic, A., Clift, R., 1999. The application of life cycle assessment to process optimisation. *Computers & Chemical Engineering* 23, 1509–1526.
- Bonou, A., Olsen, S.I., Hauschild, M.Z., 2015. Introducing life cycle thinking in product development – A case from Siemens Wind Power. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 64, 45–48.
- Davis, E., 1987. Constraint propagation with interval labels. *Artificial intelligence* 32, 281–331.
- Diagne, S., Coulibaly, A., De Beuvron, F.D.B., 2016. Complex product modeling based on a Multi-solution eXtended Conceptual Design Semantic Matrix for behavioral performance assessment. *Computers in Industry* 75, 101–115.
- Eisenhard, J.L., Wallace, D.R., Sousa, I., Schepper, M.S., Rombouts, J.P., 2000. Approximate life-cycle assessment in conceptual product design, in: *Proceedings of the DETC'00 ASME 2000 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Baltimore, MD, Sept. Citeseer, pp. 10–13.
- Ertas, A., Jones, J.C., 1996. *The engineering design process*. Wiley New York.
- Faltings, B., 1994. Arc-consistency for continuous variables. *Artificial intelligence* 65, 363–376.
- Finnveden, G., Hauschild, M.Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., Suh, S., 2009. Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management* 91, 1–21.
- Gomes, S., Varret, A., Bluntzer, J.B., Sagot, J.C., 2009. Functional design and optimisation of parametric CAD models in a knowledge-based PLM environment. *International Journal of Product Development* 9, 60.
- Grossmann, I.E., Caballero, J.A., Yeomans, H., 1999. Advances in mathematical programming for automated design, integration and operation of chemical processes. *Korean J. Chem. Eng* 16, 407–426.
- Gungor, A., Gupta, S.M., 1999. Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey. *Computers & Industrial Engineering* 36, 811–853.

Hayes, B.E., 1998. *Measuring Customer Satisfaction: Survey Design, Use, and Statistical Analysis Methods*. ASQ Quality Press.

Joore, P., Brezet, H., 2015. A Multilevel Design Model: the mutual relationship between product-service system development and societal change processes. *Journal of Cleaner Production* 97, 92–105.

Kagawa, S., Tasaki, T., Moriguchi, Y., 2006. The environmental and economic consequences of product lifetime extension: Empirical analysis for automobile use. *Ecological Economics* 58, 108–118.

Lebbah, Y., Lhomme, O., 2002. Accelerating filtering techniques for numeric CSPs. *Artificial Intelligence* 139, 109–132.

Mackworth, A.K., 1977. Consistency in networks of relations. *Artificial intelligence* 8, 99–118.

Madeline, B., 2002. *Algorithmes évolutionnaires et résolution de problèmes de satisfaction de contraintes en domaines finis*. Université Nice Sophia Antipolis.

Masui, K., Sakao, T., Kobayashi, M., Inaba, A., 2003. Applying Quality Function Deployment to environmentally conscious design. *International Journal of Quality & Reliability Management* 20, 90–106.

Mattson, C.A., Lofthouse, V., Bhamra, T., 2015. Exploring Decision Tradeoffs in Sustainable Design, in: *ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. American Society of Mechanical Engineers, pp. V004T05A046–V004T05A046.

Mettas, A., 2000. Reliability allocation and optimization for complex systems, in: *Reliability and Maintainability Symposium, 2000. Proceedings. Annual. IEEE*, pp. 216–221.

Millet, D., Bistagnino, L., Lanzavecchia, C., Camous, R., Poldma, T., 2007. Does the potential of the use of LCA match the design team needs? *Journal of Cleaner Production* 15, 335–346.

Millet, D., Tchertchian, N., Brissaud, D., 2009. How to identify the most promising areas of environmental improvement at the early stages of the design process? *International Journal of Design Engineering* 2, 299–319.

Näslund, B., 1966. Simultaneous determination of optimal repair policy and service life. *The Swedish Journal of Economics* 63–73.

Ng, Y.T., Lu, W.F., Song, B., 2014. Quantification of End-of-life Product Condition to Support Product Recovery Decision. *Procedia CIRP* 15, 257–262.

Ostad-Ahmad-Ghorabi, H., Collado-Ruiz, D., Wimmer, W., 2009. Towards Integrating LCA into CAD. DS 58-7: *Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design*, Vol. 7, Design for X / Design to X, Palo Alto, CA, USA, 24.-27.08.2009.

Pieragostini, C., Mussati, M.C., Aguirre, P., 2012. On process optimization considering LCA methodology. *Journal of Environmental Management* 96, 43–54.

Popoff, A., Millet, D., Pialot, O., 2016. Development of usage models for the ecodesign of products: the concept of usage ecodrift. *Int J Interact Des Manuf* 1–6.

Pugh, S., 1991. *Total design: integrated methods for successful product engineering*. Addison-Wesley.

- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W.-P., Suh, S., Weidema, B.P., Pennington, D.W., 2004. Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment international* 30, 701–720.
- Rostam, S., 1993. Service life design-the European approach. *Concrete International* 15.
- Serna-Mansoux, L., Popoff, A., Millet, D., 2014. A Simplified Model to Include Dynamic Product-User Interaction in the Eco-Design Process. *Journal of Industrial Ecology* 18, 529–544.
- Sousa, I., Wallace, D., Eisenhard, J.L., 2000. Approximate Life-Cycle Assessment of Product Concepts Using Learning Systems. *Journal of industrial Ecology* 4, 61–81.
- Taguchi, G., Elsayed, E.A., Hsiang, T.C., 1989. *Quality engineering in production systems*. McGraw-Hill College.
- Tchertchian, N., Millet, D., Yvars, P.-A., 2014. How to Improve Environmental Performance by Negotiating Functional Specifications of Complex System? *Procedia CIRP* 15, 449–454.
- Tchertchian, N., Yvars, P.-A., Millet, D., 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. *Journal of Cleaner Production* 42, 1–18.
- Tsang, E., 2014. *Foundations of Constraint Satisfaction: The Classic Text*. BoD—Books on Demand.
- van Nes, N., Cramer, J., 2005. Influencing product lifetime through product design. *Business Strategy and the Environment* 14, 286–299.
- van Nes, N., Cramer, J., 2006. Product lifetime optimization: a challenging strategy towards more sustainable consumption patterns. *Journal of Cleaner Production* 14, 1307–1318.
- Wilberg, J., Hollauer, C., Omer, M., 2015. Supporting the Performance Assessment of Product-service Systems During the Use Phase. *Procedia CIRP* 30, 203–208.
- Yannou, B., Wang, J., Yvars, P.-A., 2010. Computation of the Usage Contexts Coverage of a Jigsaw With CSP Techniques. *ASME*, pp. 369–378.
- Yatsenko, Y., Hritonenko, N., 2008. Properties of optimal service life under technological change. *International Journal of Production Economics* 114, 230–238.
- Yvars, P.A., Lafon, P., Zimmer, L., 2009. Optimization of mechanical system: Contribution of constraint satisfaction method, in: *Computers & Industrial Engineering*, 2009. CIE 2009. International Conference on. IEEE, pp. 1379–1384.
- Ziout, A., Azab, A., Atwan, M., 2014. A holistic approach for decision on selection of end-of-life products recovery options. *Journal of Cleaner Production* 65, 497–516.

Chapitre 7. Intégration des dérives d'usages au sein de la méthode EcoCSP-QFD

Dans les chapitres 4, 5 et 6, nous avons, dans un premier temps, étudié la question de l'identification des usages réels d'un produit par la diversité de ses utilisateurs puis, dans un second temps, exploré les problématiques de la modélisation de produits attractifs en prenant comme point de départ de nos réflexions la liste des besoins côté client. Dans cette partie, nous allons étudier les possibilités de coupler ces deux approches afin d'intégrer le concept de dérive d'usage à l'approche EcoCSP-QFD.

Cette intégration se fait à plusieurs étapes de l'approche EcoCSP-QFD : en premier lieu lors de la réalisation des matrices phases 1 et 2 du QFD où l'on pourra utiliser les données relatives aux catégories d'utilisateurs et aux aspects techniques des dérives d'usages puis, dans un second temps, lors du codage du modèle par contraintes où les dérives d'usage entreront en jeu lors du calcul du paramétrage optimal.

Première intégration : utiliser les différents segments d'utilisateurs dans la matrice planning de la maison de la qualité

Retour sur la maison de la qualité

Compléter la ou les matrices QFD est la première étape de la méthode EcoCSP-QFD. Cette étape s'effectue en groupe spécialement assemblé pour l'occasion. Govers (1996) recommande un nombre de participants situé entre six et huit personnes afin, d'une part, de regrouper un spectre de connaissances suffisamment large et, d'autre part, de permettre une discussion efficace et pouvant facilement être encadrée. Dans la pratique ce nombre est variable et doit permettre de regrouper l'ensemble des parties prenantes en lien avec le cycle de vie du produit. L'équipe ainsi constituée a pour mission de compléter la ou les matrices QFD nécessaires à l'exécution de la méthode. La matrice de la phase 1 de la méthode QFD devra à *minima* être complétée.

L'identification des exigences client est réalisée auprès de ces derniers par le biais d'enquêtes, de questionnaires, etc. et/ou auprès d'experts, avec par exemple l'utilisation de la méthode Delphi (Dalkey et al., 1972 ; Hsu et Sandford, 2007). Une fois le listing des exigences client validé, l'étape suivante est la hiérarchisation de ces dernières dans la matrice de planning, en fonction de leur importance pour les clients. Parmi les méthodes les plus utilisées pour ce faire, on trouve notamment les méthodes « gap analysis » (Danaher, 1997), les méthodes « Analytic Hierarchy Process (AHP) » (Armocost et al., 1994), les méthodes basées sur le modèle Kano (Kano, 1984) et les méthodes SERVQUAL dans le cadre des services (Wisniewski, 2001). Nous nous intéresserons ici plus en détail aux approches AHP et Kano qui ont fait l'objet de nombreux travaux et semblent être les mieux adaptées à la (re)conception de produits.

Méthode traditionnelle de type « gap analysis »

Au sein de la maison de la qualité phase 1, la matrice de planning couramment utilisée pour le calcul du score d'importance global des besoins clients fait intervenir trois acteurs : les clients, la concurrence (et les objectifs associés) et la stratégie d'entreprise. Elle est donc un outil évident où faire valoir le travail sur les différents segments d'utilisateurs vu au chapitre 4. La matrice de planning permet de retranscrire les spécificités de chaque segment d'utilisateurs vis-à-vis de chacun des besoins clients. Les personnes appartenant aux différents segments ayant des usages différents et donc des attentes différentes en matière de fonctionnalité, leurs appréciations de l'importance de chaque besoin sont susceptibles d'afficher des divergences plus ou moins importantes. La matrice de planning permet un affichage clair et une prise en compte de ses divergences (tableau 19).

Afin d'éviter un lissage trop important des spécificités des différents segments d'utilisateurs, le score de chaque segment est pondéré avant d'effectuer le calcul de leur moyenne qui détermine le score global de la partie « client » de la matrice de planning. Cette pondération permet de favoriser la prise en compte d'un ou plusieurs segments dans la suite du processus de modélisation. Ce coefficient peut être calculé de manière quantitative, par exemple à partir de la proportion de la population d'utilisateurs que représente chaque segment. Il peut également être déterminé de manière qualitative, par exemple pour représenter une stratégie d'entreprise dont la volonté est de cibler particulièrement une ou plusieurs catégories d'utilisateurs.

Tableau 19
Matrice de planning du cas d'étude de l'aspirateur balai

Besoins	Score global	Importance clients (note de 0 à 5 * coeff. d'importance)							Concurrence et objectifs (note de 0 à 5)					Stratégie Score (1; 1,2 ou 1,5)
		C1: Hygiène CoeffC1	C2: Confort CoeffC2	C3: Ecolo CoeffC3	Score (moyenne)	Actuel	Concurr1	Concurr2	Idéal	Score (idéal/actuel)				
Facile à manier	6,9	4,0	1,5	5,0	1,5	3,0	1,0	4,1	4,0	4,0	5,0	5,0	1,3	1,5
Compact	5,9	3,0	1,5	4,0	1,5	3,0	1,0	3,4	3,0	4,0	5,0	4,0	1,3	1,2
Silencieux	7,6	4,0	1,5	5,0	1,5	3,0	1,0	4,1	2,0	2,0	2,0	4,0	2,0	1,5
Aspiration efficace	8,2	5,0	1,5	5,0	1,5	5,0	1,0	5,0	3,0	3,0	5,0	5,0	1,7	1,5
Grande autonomie	8,0	5,0	1,5	5,0	1,5	4,0	1,0	4,8	2,0	4,0	2,0	4,0	2,0	1,2
Robuste	6,6	4,0	1,5	4,0	1,5	5,0	1,0	4,3	3,0	3,0	4,0	4,0	1,3	1,0
Sans entretien	6,0	3,0	1,5	5,0	1,5	3,0	1,0	3,8	4,0	3,0	5,0	4,0	1,0	1,2
Recharge rapide	6,0	4,0	1,5	4,0	1,5	2,0	1,0	3,5	2,0	3,0	5,0	3,0	1,5	1,0
Faible conso	4,8	2,0	1,5	2,0	1,5	5,0	1,0	2,8	3,0	4,0	3,0	3,0	1,0	1,0
Prix accessible	5,6	3,0	1,5	4,0	1,5	3,0	1,0	3,4	3,0	4,0	4,0	3,0	1,0	1,2
Esthétique	4,2	2,0	1,5	2,0	1,5	2,0	1,0	2,0	4,0	2,0	3,0	4,0	1,0	1,2
Sans odeurs	6,8	5,0	1,5	5,0	1,5	4,0	1,0	4,8	4,0	2,0	5,0	4,0	1,0	1,0
Recyclable	8,5	1,0	1,5	1,0	1,5	5,0	1,0	2,0	1,0	5,0	3,0	5,0	5,0	1,5

Une méthode innovante utilisant le modèle Kano et l'AHP

Le modèle de Kano est théorisé par Noriaki Kano en 1984 à partir du constat que « la satisfaction et l'insatisfaction résultant chez un observateur de la perception d'un produit ou d'un service ne sont pas des concepts de valeur symétrique ». Cela signifie par exemple que l'existence d'une qualité (ou d'une fonction) peut provoquer la satisfaction d'un client sans que son absence ne provoque d'insatisfaction. Sur la base de ce constat, Kano identifie cinq types de qualités distincts présentés dans le tableau 20.

Tableau 20

Les 5 types de qualité du modèle de Kano

Must-be	Ces attributs souvent implicites - du fait qu'ils sont considérés comme essentiels : Leur présence et leur bon fonctionnement sont perçus comme « normaux » sinon obligatoires. S'ils remplissent leur rôle, tout va bien, mais la situation est juste normale. À l'inverse, leur absence ou leur dysfonctionnement provoquent inmanquablement une insatisfaction - ressentie comme légitime- qui peut tourner à la frustration.
One-dimensional	Ces attributs accroissent la satisfaction à proportion de la façon dont on les satisfait. La satisfaction ou l'insatisfaction résulte de l'adéquation de la performance constatée par rapport à la performance annoncée ou suggérée : Satisfaction quand ils sont présents et fonctionnent, insatisfaction lorsque ces attributs ne sont pas présents ou ne correspondent pas à l'attente créée.
Attractive	Ces attributs rencontrent la satisfaction du client quand ils sont présents et fonctionnent effectivement. Ces attributs sont réputés ne pas faire « normalement » partie du produit. Leur perception constitue donc une « heureuse surprise », mais leur absence n'entraîne pas de mécontentement ou d'avis négatif sur le produit. Ces attributs augmentent la satisfaction de manière implicite : ils correspondent à des besoins latents ou émergents (pas vraiment exprimés, sinon inconscients).
Indifferent	De tels attributs ne provoquent pas du fait de leur présence/absence de mécontentement ou d'insatisfaction significatifs.
Reverse	Ces attributs - du fait de la diversité des opinions et des usages - sont interprétés par les uns comme un avantage (satisfaction) et considérés par d'autres comme un inconvénient (insatisfaction).

Ces qualités peuvent être représentées graphiquement sous la forme de la figure 51 :

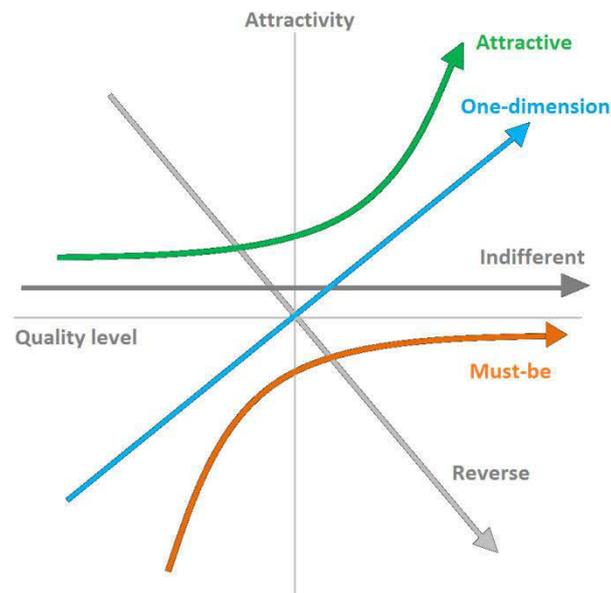


Fig. 51. Représentation graphique des 5 types de qualité du modèle de Kano

On trouve dans la littérature plusieurs utilisations du modèle de Kano qui testent différentes méthodes pour pondérer les exigences client de la matrice phase 1 du QFD. En première approche, Robert-shaw (1995) priorise les exigences client de la manière suivante : premièrement assurer les fonctions « Must-be », deuxièmement optimiser les fonctions « One-dimension », troisièmement développer si possible les fonctions « Attractive » qui ne sont pas indispensables mais sont susceptibles d'apporter un avantage concurrentiel au produit. Ismail et Liu (1995), de même que Matzler et Hinterhuber (1998), mettent également en valeur ces trois types de fonctions et les priorise par des systèmes de pondération spécifiques. Lee et al. (2008) développent dans leur étude une méthode de double notation permettant de mieux prendre en compte l'aspect émotionnel des réponses lors des enquêtes pour l'identification et la hiérarchisation des besoins clients. Tontini (2000) présente une méthode afin de mieux différencier les fonctions « Must-be » et « Attractive ». Lai et al. (2004) proposent une évolution des approches Kano en mettant en avant les conséquences de l'innovation sur la désirabilité des produits. Csecur (2016) identifie dans la littérature plusieurs limites à l'intégration du modèle Kano et propose de coupler ce dernier à l'approche SERVQUAL pour combler ses lacunes.

La méthode “Analytic Hierarchy Process” (AHP) (Saaty , 1990) a été développée par Thomas L. Saaty dans les années 70. Outil performant pour les problèmes de « Multiple Choice Decision Making », l’AHP permet notamment de hiérarchiser des solutions par rapport à un objectif à atteindre au regard de différents critères (figure 52). De ce fait, l’AHP a été utilisé pour hiérarchiser les exigences clients dans le cadre de la méthode QFD de manière semblable par de nombreux auteurs (voir l’étude bibliographique de Ho, 2008).

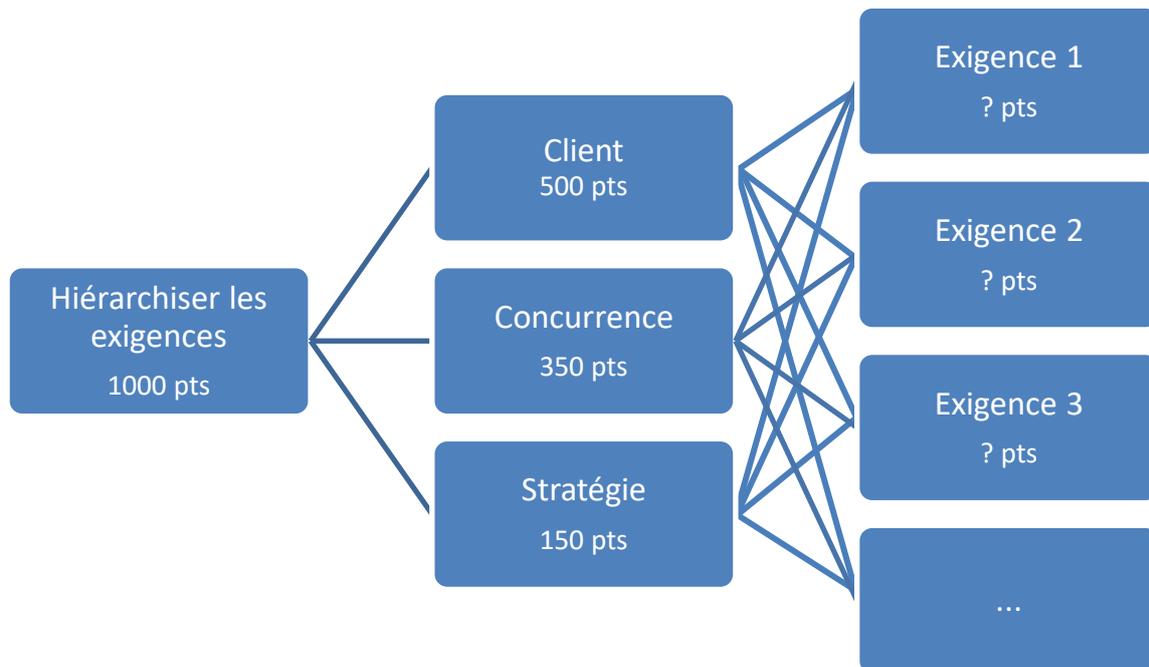


Fig. 52. Hiérarchisation des exigences client par la méthode AHP reprenant les mêmes pondérations Client-Concurrence-Stratégie que la méthode traditionnelle

Tan et al. (2010), puis Chaudha et al. (2011), mettent en place des systèmes basés sur le modèle Kano pour ajuster le score d’amélioration calculé dans la « planning matrix », soit par la méthode traditionnelle, soit par la méthode AHP :

$$IR_{adj} = (IR_0)^{k-1}$$

Eq. 7. Le facteur d’amélioration de Tan et al. (2010)*

$$IR_{adj} = (1 + m)^k \times IR_0$$

Eq. 8. Le facteur d’amélioration de Chaudha et al. (2011)*

* IR_0 le coefficient d’amélioration classique ; $K = 0.5, 1$ ou 2 pour les qualités respectivement « Must-be », « One-dimension » et « Attractive » ; m le ratio de satisfaction chez Chaudha.

Ces dernières méthodes doivent permettre une prise en compte fine des exigences client en sécurisant le processus de hiérarchisation. Cette étape étant le point de départ de notre méthodologie, il est

raisonnable d'y consacrer la quantité de ressources nécessaire à l'obtention d'une hiérarchisation solide et présentant le minimum d'incertitudes et d'approximations.

Intégration des dérives d'usage

Nous avons vu que les méthodes pour la hiérarchisation des exigences client existent et permettent d'obtenir des résultats correspondant bien à la réalité du terrain. Nous avons aussi vu que les exigences, de même que les dérives d'usage des différents segments d'utilisateurs, peuvent être identifiées par des études sur le terrain. Dans ce cadre, l'intégration des dérives d'usages peut se faire directement au niveau de la liste des exigences client. La seule étape est d'identifier quelles dérives d'usage peuvent être directement traduites en exigence. Nous proposons à titre d'exemple les traductions suivantes pour les dérives d'usage tirées du cas de l'aspirateur balai (tableau 21).

Tableau 21

Traduction des dérives d'usage en exigences client pour le cas de l'aspirateur balai

Dérive d'usage	Traduction en exigence
D1. laisser l'aspirateur en charge en permanence hors période d'utilisation ;	Gestion automatique de la charge
D2. ne pas nettoyer le filtre assez régulièrement ;	Aucun entretien à fournir/filtre auto nettoyant
D3. continuer à aspirer avec un réservoir plein ;	Avoir un avertisseur de réservoir plein
D4. aspirer en utilisant uniquement la puissance maximale d'aspiration ;	Gestion automatique de la puissance
D5. ne pas préparer la pièce avant d'aspirer.	-

Une fois ces exigences incluses dans la maison de la qualité, la méthodologie peut être suivie de manière habituelle.

Deuxième intégration : utiliser les caractéristiques techniques pour corriger les comportements qui créent le plus d'impacts

Dans un deuxième temps, les matrices phases 1 et 2 de la méthode QFD peuvent être utilisées pour intégrer les éléments techniques en lien avec les dérives d'usage. Rappelons que dans le cas d'étude de l'aspirateur balai développé au chapitre 4 les dérives d'usage identifiées étaient les suivantes :

- D1. laisser l'aspirateur en charge en permanence hors période d'utilisation ;
- D2. ne pas nettoyer le filtre assez régulièrement ;
- D3. continuer à aspirer avec un réservoir plein ;
- D4. aspirer en utilisant uniquement la puissance maximale d'aspiration ;
- D5. ne pas préparer la pièce avant d'aspirer.

Pour chacune de ses dérives d'usage, il convient de se demander quelles sont les solutions permettant d'amener à un comportement optimisé de la part de l'utilisateur. Deux catégories de solutions se distinguent a priori : les solutions « côté produit » et les solutions « côté utilisateur ». Par exemple,

une meilleure gestion de la puissance d'aspiration (D4) peut être obtenue soit, côté produit, par la modification du bouton poussoir voire sa suppression (n'autorisant ainsi qu'un unique mode de fonctionnement et permettant de faire l'économie du bouton et de la carte électronique de commande), soit, côté utilisateur, par une stratégie de feedback dont le but serait d'inculquer à l'utilisateur les règles d'une utilisation optimale. Pour la dérive d'usage concernant la préparation préalable de la pièce (D5), il n'existe pas a priori de dispositif technique côté produit permettant de remédier au problème ; les solutions se trouveront donc côté utilisateur avec l'utilisation de stratégies de feedback.

Comme évoqué dans le chapitre 4, ces deux types de solutions, côté produit ou utilisateur, présentent chacun des avantages et des inconvénients. En première approche, il est souvent reproché aux solutions côté utilisateur qu'elles n'offrent aucune garantie de succès. L'utilisateur reste en effet libre, dans le cas de l'utilisation du feedback, de suivre ou de ne pas suivre les conseils qui lui sont donnés. Il est donc très peu contraint par ce type de solutions qui nécessite de sa part une volonté de coopérer. A l'inverse, les solutions côté produit peuvent ne laisser aucun choix à l'utilisateur qui peut alors se sentir brider dans son usage habituel et refuser l'utilisation d'un tel produit. Un usage trop restreint peut aussi être la cause de l'apparition de dérives d'usage liées au contournement de la contrainte par l'utilisateur. Dans le cas de solutions côté produit du type « forced functionality », où le produit est conçu de manière à contraindre fortement l'usage pour éviter de s'éloigner de l'usage optimal, il apparaît nécessaire de bien informer l'utilisateur de manière à ce qu'il comprenne et accepte le schéma d'usage proposé.

Dans le cas où les dérives d'usage soient liées à des aspects techniques du produit, il y a de fortes chances que ces aspects techniques apparaissent dans l'une des matrices de la méthode QFD. En effet, les dérives d'usages étant liées aux usages et donc aux besoins des utilisateurs, la mise en relation, dans la matrice phase 1, des besoins des clients avec les caractéristiques techniques du produit doit nécessairement faire apparaître les aspects techniques liés aux dérives d'usage. Dans le cas de l'aspirateur balai, on retrouvera dans les caractéristiques techniques des éléments liés au chargeur, au filtre, au réservoir et à la puissance d'aspiration. Ces caractéristiques devront être traitées en prenant en compte leur importance quant à la réalisation d'une utilisation optimale. Dans la matrice phase 1 relative à l'aspirateur balai (figure 53), nous avons fait apparaître deux nouvelles lignes (trame de fond verte) permettant d'inclure les données issues de l'étude des dérives d'usage afin que ces données soient visibles lors des réflexions concernant la conception du produit. La première ligne permet de faire apparaître un coefficient multiplicateur en fonction de l'importance des dérives d'usage. Ce coefficient peut être soit (i) calculé de manière quantitative, par exemple selon la valeur des impacts environnementaux associés à chaque dérive d'usage, soit (ii) déterminé de manière qualitative, par exemple selon une stratégie de conception et de communication spécifique de la part de l'entreprise. La seconde ligne permet d'inclure le type de solution envisagé pour contrer la dérive d'usage (ici *F* pour *forced functionality*, *E* pour *ecofeedback*). Ces données, bien qu'elles ne soient pas nécessairement

modélisables dans le cadre d'une optimisation ultérieure par CSP, permettent d'étoffer les matrices QFD et de renforcer leur rôle d'outil de capitalisation des connaissances relatives au problème d'écoconception du produit considéré.

		Caractéristiques techniques													Score global	Pourcentage
		Ergonomie	Dimensions	Isolation phonique	Puissance moteur	Tête d'aspiration	Capacité batterie	Matériaux	Réservoir	Chargeur	Coûts	Filtre	Modularité			
Besoins clients	Facile à manier	9	3												6,88	8%
	Compact		9					1							5,91	7%
	Silencieux			9	3										7,63	9%
	Aspiration efficace				9	9					1				8,17	10%
	Grande autonomie				3		9								7,95	9%
	Robuste							9							6,58	8%
	Sans entretien								9			3			5,95	7%
	Recharge rapide						9			9					6,00	7%
	Faible conso				9					3					4,75	6%
	Prix accessible										9				5,58	7%
	Esthétique														4,20	5%
	Sans odeurs											9			6,75	8%
	Recyclable							9					9		8,50	10%
		Pondération DU				1,5				1,2	1,5		1,2			
	Correction DU				F				F/E	E		F/E				
	Priorités techniques	62	74	69	163	74	126	136	59	68	50	87	77			
	Pourcentage	6%	7%	7%	16%	7%	12%	13%	6%	7%	5%	8%	7%			
	Produit actuel															
	Valeur min.															
	Valeur Max.															
	Valeur cible															

Fig. 53. Matrice QFD phase 1 du cas d'étude de l'aspirateur balai

La matrice phase 2 de la méthode QFD (figure 54) ne reçoit pas de modification particulière dans le cadre de l'intégration des dérives d'usage au processus de conception. Si l'on continue notre cas d'étude de l'aspirateur balai, la matrice phase 2 sera de la forme suivante.

		Caractéristiques composants																		
		Rotule tête d'aspiration	Longueur	Diamètre	Matériau isolant	Epaisseur isolant	Puissance moteur	Contrôle puissance	Surface aspirante	Force venturi	Capacité batterie	Technologie batterie	Matériaux	Volume réservoir	Technologie chargeur	Technologie filtre	Dimensions filtre	Recyclabilité	Assemblages démontables	
		Scores																		
Caractéristiques techniques	Ergonomie	62	9	3			1	1			1									
	Dimensions	74		9	9		1				1			3						
	Isolation phonique	69				9	9	9												
	Puissance moteur	163					9	9												
	Tête d'aspiration	74							9	9										
	Capacité batterie	126					3				9	9								
	Matériaux	136											9					9		
	Réservoir	59												9						
	Chargeur	68													9					
	Coûts	50					1	1			3	9	9		1	1	1		3	
	Filtre	87														9	9			
	Modularité	77																	9	
		Priorité		557	850	664	618	618	2884	1648	662	662	1324	1324	1490	757	664	831	831	1454
	%		3%	5%	4%	3%	3%	14%	8%	4%	4%	8%	8%	9%	4%	4%	4%	4%	7%	4%
	Produit actuel																			
	Valeur min.																			
	Valeur Max.																			
	Valeur cible																			

Fig. 54. Matrice QFD phase 2 du cas d'étude de l'aspirateur balai

Troisième intégration : stratégies de modélisation des dérives d'usage en CSP

Une première approche pertinente est celle dite de la couverture des usages. Elle consiste à calculer un modèle de produit qui couvre une certaine étendue de la variété des usages faits par les utilisateurs. Dans cette approche, il est acceptable de ne pas couvrir la totalité des usages et de couvrir certains usages mieux que d'autres ; donc de correspondre à certains utilisateurs plus qu'à d'autres. Ces questions de compromis doivent être adressées dans le cahier des charges du produit et négociées au cours de son processus de conception.

L'approche développée dans cette optique par Yannou et al. (2010) consiste à élaborer un modèle par contraintes d'un produit où sont insérées des variables « utilisateur ». Dans leur étude, un modèle de scie sauteuse est créé et deux variables utilisateur sont utilisées : le genre de l'utilisateur et sa maîtrise

du produit. Ces variables influencent la manière dont l'utilisateur va se servir de la scie (force exercée pour maintenir l'outil, vitesse d'avance, etc.) et joue donc un rôle dans le calcul du paramétrage optimal qui détermine la puissance de la scie, sa masse, la vitesse de la lame, etc. Différents scénarios d'usage sont définis en fonction de l'utilisateur et du type de bois à couper (essence et épaisseur). Plusieurs modèles de scie sont alors calculés dans le but de remplir les besoins du plus grand nombre de scénarios possible. Si une seule scie optimisée ne permet pas de satisfaire à tous les scénarios (c'est-à-dire qu'elle permette à tous les utilisateurs de couper n'importe quelle épaisseur de n'importe quelle essence de bois), le principe est alors de trouver deux modèles complémentaires (ou plus le cas échéant) qui couvrent à eux deux la totalité des usages présents dans les scénarios (dans l'étude : une version 150W et une version 200W).

Dans le cas des dérives d'usage, une stratégie similaire peut s'appliquer. Les segments d'utilisateurs et les dérives d'usage servent alors à élaborer les différents scénarios d'usage de l'étude de Yannou et al. (2010).

Références

- Armocost, R.L., Compton, P.J., Mullens, M.A., Swart, W.W., 1994. An AHP framework for prioritizing customer requirements in QFD: an industrialized housing application. *IIE transactions* 26, 72–79.
- Chaudha, A., Jain, R., Singh, A.R., Mishra, P.K., 2011. Integration of Kano's Model into quality function deployment (QFD). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 53, 689–698.
- Csecur, K., Lindberg, M., 2016. Customer Satisfaction Analysis—Combination of SERVQUAL, Kano model and Quality Function Deployment.
- Dalkey, N.C., 1972. *STUDIES IN THE QUALITY OF LIFE; DELPHI AND DECISION-MAKING*.
- Danaher, P.J., 1997. Using conjoint analysis to determine the relative importance of service attributes measured in customer satisfaction surveys. *Journal of retailing* 73, 235–260.
- Govers, C.P., 1996. What and how about quality function deployment (QFD). *International journal of production economics* 46, 575–585.
- Ho, W., 2008. Integrated analytic hierarchy process and its applications—A literature review. *European Journal of operational research* 186, 211–228.
- Hsu, C.-C., Sandford, B.A., 2007. The Delphi technique: making sense of consensus. *Practical assessment, research & evaluation* 12, 1–8.
- Ismail, N.H., Mandil, G., Zwolinski, P., 2015. Analysis of the existing design for remanufacturing tools: A first step toward an integrated design platform for remanufacturing, in: *ICOR-International Conference on Remanufacturing*. Amsterdam, Netherlands, pp. 408–425.
- Kano, N., 1984. Attractive quality and must-be quality. *J. Jpn. Soc. Quality Control* 14, 39–48.
- Lai, X., Xie, M., Tan, T.C., 2004. Optimizing product design using the Kano model and QFD, in: *Engineering Management Conference, 2004. Proceedings. 2004 IEEE International*. IEEE, pp. 1085–1089.
- Lee, Y.-K., Lee, C.-K., Lee, S.-K., Babin, B.J., 2008. Festivalscapes and patrons' emotions, satisfaction, and loyalty. *Journal of Business Research* 61, 56–64.
- Matzler, K., Hinterhuber, H.H., 1998. How to make product development projects more successful by integrating Kano's model of customer satisfaction into quality function deployment. *Technovation* 18, 25–38.
- Saaty, T.L., 1990. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research* 48, 9–26.

- Tan, Y., Shen, L., Langston, C., Liu, Y., 2010. Construction project selection using fuzzy TOPSIS approach. *Journal of modelling in management* 5, 302–315.
- Tontini, G., 2000. Identification of customer attractive and must-be requirements using a modified Kano's method: Guidelines and case study, in: *ASQ World Conference on Quality and Improvement Proceedings*. American Society for Quality, p. 728.
- Wisniewski, M., 2001. Using SERVQUAL to assess customer satisfaction with public sector services. *Managing Service Quality: An International Journal* 11, 380–388.
- Yannou, B., Wang, J., Yvars, P.-A., 2010. Computation of the Usage Contexts Coverage of a Jigsaw With CSP Techniques 369–378. doi:10.1115/DETC2010-28677

Chapitre 8. Elargissement de la démarche en phase amont de conception : application à la sélection d'alternatives

Ce chapitre fait l'objet d'un projet de publication dans la revue *Journal of Mechanical Design*.

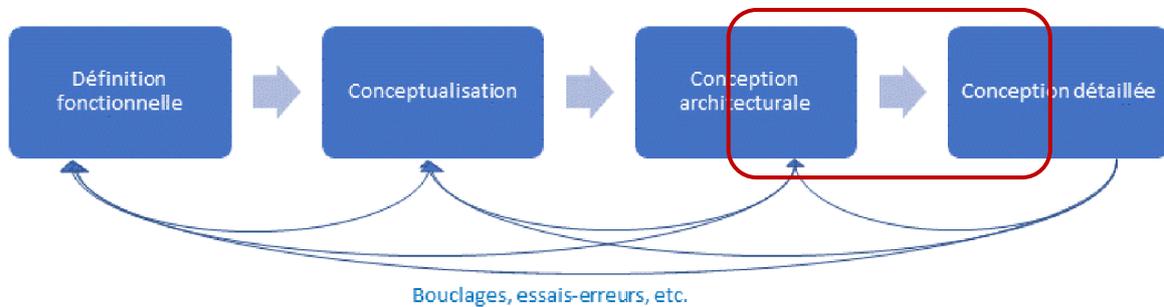
Abstract

L'utilisation de techniques d'optimisation appliquées à l'écoconception de produits passe par une étape de modélisation qui implique une rigueur plus ou moins importante pour arriver à un résultat satisfaisant. La modélisation doit décrire une certaine proportion des éléments du système étudié avec une certaine précision pour que les résultats de l'optimisation soient utilisables par les concepteurs et/ou les décideurs. Un besoin méthodologique est donc présent en phase de conception pour déterminer la qualité du modèle selon les objectifs posés. Si des indicateurs ont été développés en ce sens pour déterminer la qualité des modélisations dans le cadre de l'utilisation de logiciels d'analyse du cycle de vie, la littérature ne propose pas de travaux similaires dans le cadre de l'utilisation de techniques d'optimisations en écoconception. Les travaux présentés dans cet article proposent la création d'indicateurs mesurant la criticité des modèles selon leur importance pour l'optimisation des performances. De ces premiers résultats sont déduits des préconisations quant à la précision idéale des modèles. Cette méthode est expérimentée sur le cas de l'optimisation d'une annexe de bateau innovante et comparée à une méthode de modélisation traditionnelle. Les résultats montrent un apport de la méthode avec une meilleure distribution des quantités de travail nécessaires à la réalisation d'une modélisation de qualité.

Introduction

De nos jours, la plupart des entreprises fait face à une concurrence rude sur son marché. Les impératifs de croissance et l'émergence rapide de nouveaux produits et de nouvelles technologies, de même que les évolutions des besoins des utilisateurs, les poussent à repenser systématiquement leur offre (Trott, 2008). Cela les incite à développer des méthodes d'innovation et de conception plus efficaces, par exemple en adoptant des concepts tels que la *fast innovation* de manière à accélérer le *time to market* des produits et services qu'elles conçoivent (George et al., 2005). Dans le domaine de la conception de produits, de nombreuses approches ont été formalisées par la recherche académique et visent à conduire de manière efficace les processus d'innovation et de conception (Vezzoli et Sciamma, 2006). Ces techniques ne sont malheureusement pas toujours utilisées en raison d'un manque de temps, de ressources ou de connaissances de la part des concepteurs (Tukker et al., 2001). On constate ainsi le besoin de mettre à la disposition des concepteurs des méthodes simples et intuitives permettant d'obtenir rapidement et avec un minimum de ressources les données nécessaires à un déroulement efficace du processus de conception et à l'amélioration des performances du produit. Dans cet article, nous nous focalisons sur la problématique de la sélection des modules et composants au sein de leurs ensembles d'alternatives possibles. Nous développons une méthode basée sur une technique d'optimisation (à l'échelle du cycle de vie) permettant d'effectuer une sélection pertinente

d'alternatives en fonction de leurs performances intrinsèques et des conséquences de leur choix sur le reste du système. Nous étudions l'intérêt d'une telle méthode en la comparant à une approche classique.



Dans cet article, nous nous intéressons aux techniques de sélection dans le cadre du choix des alternatives de conception. Cette sélection est une étape préliminaire indispensable permettant de gagner un temps de travail important lors de l'étape suivante de conception détaillée où est modélisé l'ensemble du produit pour l'optimisation de ses performances (Krishnan et Bhattacharia, 2002 ; Li et Azarm, 2000). De plus, nous proposons de mettre en premier plan les aspects de soutenabilité et de cycle de vie au sein du processus de décision.

Modéliser la totalité du cycle de vie d'un produit et de ses alternatives pour être sûr d'aboutir à une solution « optimum global » n'est pas envisageable dans le paradigme d'une entreprise soumise à de strictes contraintes en matière de *time to market*. Cependant, éliminer certaines alternatives sans avoir pu tester leur influence sur le système par le biais de la modélisation et de l'optimisation revient à occulter une partie de l'espace de conception, sans l'avoir explorée, alors qu'elle pourrait receler des solutions intéressantes. Cette sélection arbitraire est motivée par les gains de temps de modélisation réalisés. Si le nombre d'alternatives est important, ces derniers peuvent en effet devenir excessivement longs et aller jusqu'à entraver sévèrement le processus de conception où des délais stricts doivent souvent être respectés. Un modèle très précis sera généralement aussi plus complexe ; composé d'équations plus nombreuses et d'ordres supérieurs. De tels modèles peuvent s'avérer difficile à associer aux outils d'écoconception classiques tels que les logiciels d'ACV. Leur intérêt se trouve limité s'ils ne permettent pas de tirer rapidement des conclusions sur les choix de conception à faire. Pour permettre d'explorer un grand nombre d'alternatives sans consacrer un temps de modélisation excessif, nous proposons, avec la méthode développée ici, d'utiliser une modélisation « gros grain » permettant une optimisation de la sélection d'alternatives, étape indispensable avant une modélisation plus précise du système-produit et d'une sélection réduite d'alternatives.

Ayant la volonté d'appliquer nos travaux au cas des démarches d'écoconception, l'ACV doit nécessairement pouvoir être associé à la méthode développée ici. L'ACV est l'outil principal des écoconcepteurs pour considérer et quantifier la diversité des impacts environnementaux associés aux

matériaux et procédés utilisés au cours du cycle de vie du produit (Klöpffer, 1997 ; Rödger et al., 2016). Réaliser l'ACV complète d'un produit et de ses alternatives de conception permet notamment d'identifier précisément les opportunités d'amélioration des performances environnementales. C'est un exercice extrêmement utile mais qui peut être, selon la complexité du système et le nombre d'alternatives, très coûteux en ressources et en temps. En conséquence, les ACV sont souvent réalisées *a posteriori*, une fois la majorité des choix de conception verrouillés afin que la modélisation du système soit la plus simple possible (Cabeza et al., 2014 ; Frischknecht, 2007). Les résultats obtenus ne servent alors qu'à valider ou infirmer le respect des seuils réglementaires en matière d'impact environnementaux. L'optimisation des performances environnementales ne jouent dans ce cas pas un rôle directeur fort au cours du processus de conception, bien qu'elle fasse partie des objectifs du cahier des charges. De plus, l'ACV reste réservée aux initiés qui sont généralement rares au sein d'une entreprise. Des difficultés de communication, de transmission et donc d'exploitation des résultats peuvent en découler. Pour résoudre ces problèmes, des méthodologies d'ACV simplifiées ont été développées à l'attention principalement des ingénieurs et chercheurs du secteur industriel (Park et Seo, 2006). Dans notre méthode, en attribuant aux modélisations des éléments d'un produit des coefficients représentant les performances environnementales (obtenus à partir de calculs d'ACV), nous voulons placer les critères environnementaux au cœur du processus de sélection d'alternatives et de conception.

Dans la suite, nous proposons une méthode d'aide à la conception permettant de sélectionner judicieusement les alternatives de conception intéressantes. Elle s'appuie sur les principes de la modélisation par contrainte pour obtenir (i) une sélection optimisée d'alternatives de conception et (ii) un paramétrage des variables de conception permettant d'approcher un optimum quant aux performances environnementales du système (l'ensemble du cycle de vie pouvant être pris en compte). Les données environnementales sont obtenues par l'utilisation d'un logiciel et d'une base de données d'ACV. Les résultats de cette approche sont comparés avec ceux d'une approche plus intuitive basée sur un système de pondération utilisant l'expertise du groupe de conception comme principale source.

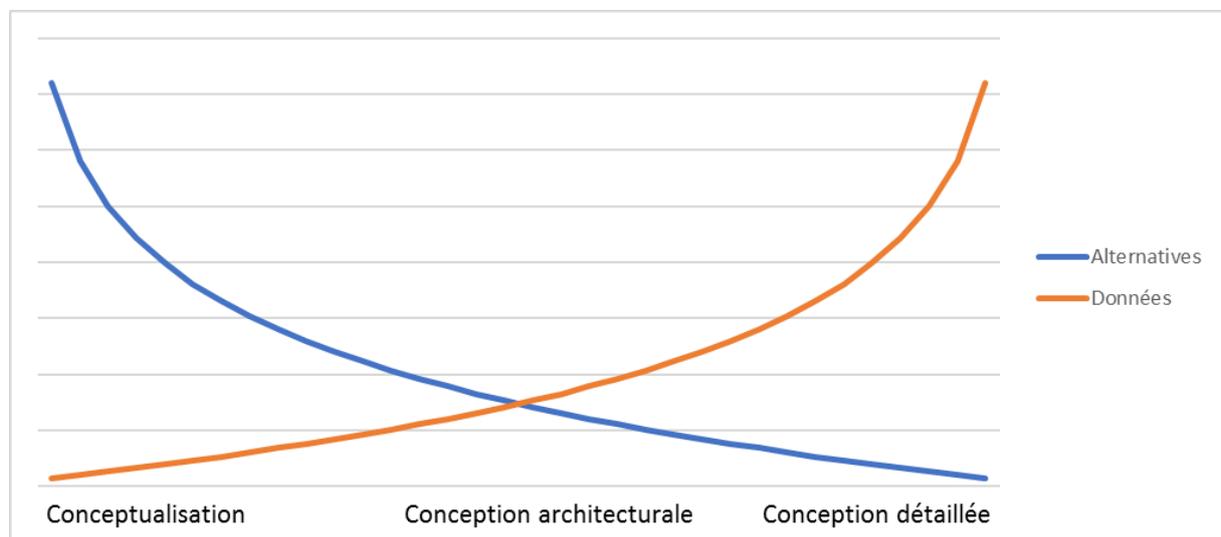
L'article est structuré de la manière suivante : la section 2 présente un état de l'art des techniques développées par la communauté scientifique pour aider les concepteurs à mieux appréhender les choix de conception auxquels ils sont confrontés ; la section 3 présente la méthode que nous proposons de mettre en place pour remplir les lacunes identifiées par l'analyse bibliographique et un protocole expérimental de validation est proposé ; dans la section 4 les différentes méthodes sont comparées, illustrées et discutées sur un cas pratique ; enfin, dans la section 5, une discussion est ouverte et des conclusions sont tirées des travaux réalisés.

Les choix en phase de conception

Le processus de conception de produit est un enchaînement d'étapes et d'activités déployées au sein d'une entreprise pour concevoir et commercialiser un produit. Ces activités regroupent des tâches intellectuelles, organisationnelles et parfois physiques dans le cas de la réalisation de prototypes. Un processus de conception réussi permet de garantir la qualité des produits commercialisés, participe au succès commercial des produits, permet de capitaliser -et de restituer sur les projets suivants- les savoir-faire de l'entreprise en matière d'organisation, de management, de planification, d'innovation, etc. En première approche, comme illustré dans le tableau 22, le processus de conception peut être vu comme la transformation d'un ensemble important d'alternatives peu détaillées en l'association d'une sélection réduite d'alternatives très détaillées au regard des exigences spécifiées dans le cahier des charges du produit, celui-ci n'étant pas nécessairement figé durant le déroulement du processus de conception. Les premières phases du processus de conception font intervenir de nombreuses activités dans le cadre de prises de décisions souvent caractérisées par le manque de données disponibles (ou par la faible fiabilité des données). Pour ces raisons, on les retrouve parfois dénommées *fuzzy front end project planning* (traduit par « phase de définition fonctionnelle » en français) dans la littérature (Koen et al., 2001). Viennent ensuite les étapes de définition conceptuelle, de conception architecturale puis de conception détaillée (Gerhard et Beitz, 1977).

Tableau 22

Evolution du nombre d'alternatives et des besoins en données associées selon les phases du processus de conception



Le processus débute avec l'identification des besoins côté client. Cette tâche est habituellement effectuée via des études sur le terrain et l'emploi d'outils tels que le QFD pour la hiérarchisation des besoins et l'identification des moyens de les satisfaire (Courage et Baxter, 2005). Ces moyens sont en premier lieu les fonctions du produit qui seront disponible aux utilisateurs (Bevan, 1999). Les fonctions sont dans un premier temps exprimées de manière à ne pas être orientées vers des solutions

techniques particulières. A partir des fonctions, la conception du produit en tant que telle peut commencer, dans un premier temps par une structuration modulaire dans laquelle les modules sont dédiés à opérer une ou plusieurs fonctions. La complexité du système apparaît avec la définition de l'ensemble des modules et de leur caractéristiques (matériaux et compatibilité, dimensionnement, configuration, durée de vie, usage...) et la prise en compte des interactions multiples (dépendances, problématiques de montage/démontage, maintenances décalées, fins de vies dissociées, etc.). Dans ces circonstances, le choix de la meilleure combinaison de modules implique déjà une complexité telle que le seul esprit humain n'est pas en mesure d'appréhender la combinatoire de l'arborescence des alternatives. Le choix de certaines alternatives plutôt que d'autres est la pierre angulaire d'une convergence maîtrisée du processus de conception vers un résultat optimisé. Notamment au cours des premières étapes de conception, il est vital que les bons choix soient réalisés étant donné qu'ils imposent une direction pour la suite du processus. Au plus juste est cette trajectoire au commencement, minimale sera la déviation finale par rapport à une solution théorique optimale. Il est donc judicieux d'allouer les ressources nécessaires au meilleur déroulement de cette étape. Il est reconnu que l'habileté d'une entreprise à rapidement évaluer et choisir les différentes alternatives de conception est un élément essentiel pour l'amélioration de la productivité globale (Hazelrigg, 2003). Etant donné la pression que subissent les entreprises à innover de plus en plus rapidement dans un contexte de concurrence mondiale rude, la complexité du processus de conception se voit grandie et, souvent, un plus grand nombre d'alternatives doit être étudié par les concepteurs. Cela est particulièrement vrai au début du processus de conception où l'ensemble des alternatives étudié doit balayer suffisamment largement le spectre du possible afin d'y trouver les solutions les plus proches de l'optimum. Cela implique un travail inédit de la part des concepteurs : évaluer à priori une multitude de concepts sans avoir les ressources (en temps principalement) nécessaires à l'obtention de projections ou de simulations détaillées. L'apport d'outils pour l'aide à la sélection d'alternatives dans ce paradigme semble donc indispensable à la réussite du processus de conception. Ces outils doivent se baser sur des concepts et techniques éprouvés et robustes tout en restant actionnables par les équipes de conception. Plus le nombre d'alternatives augmente, plus le temps à consacrer à l'évaluation de chacune diminue, plus le besoin en outil d'aide devient crucial. Les techniques présentées dans la section 3 ont été développées par les chercheurs de la communauté scientifique académique et industrielle afin de répondre à ces problématiques.

Un ensemble de critères de choix particulier : les impacts environnementaux

La section précédente a donné un aperçu de la complexité qui peut définir les problèmes de sélection d'alternatives de conception. La volonté de se placer dans le cadre d'une démarche de soutenabilité ajoute deux dimensions supplémentaires : la prise en compte de toutes les phases du cycle de vie du produit et la considération d'une diversité d'impacts environnementaux.

Historiquement, la façon de penser des entreprises était basée sur un modèle *cradle to gate* (du berceau à la porte), signifiant qu'une fois le produit ayant passé la porte de l'acheteur, il n'était plus

de la responsabilité de l'entreprise. Cette vision partielle est peu à peu remplacée par le *cradle to grave* (du berceau à la tombe) ou le *cradle to cradle* (du berceau au berceau), où l'entreprise inclut dans son *business model* l'ensemble des phases du cycle de vie jusqu'à la fin de vie, voire prévoit des cycles de vie multiples ou en cascade. Ces schémas sont de plus en plus encouragés par les gouvernements, comme en Europe, avec la notion de « responsabilité élargie du producteur » qui permet aux états membres de mieux contrôler et réglementer le cycle de vie des produits. Ainsi, des choix qui étaient évidents auparavant lorsque la fin de vie du produit n'était pas un problème peuvent devenir problématiques. Des compromis peuvent par exemple devoir être faits pour utiliser des matériaux recyclables, réaliser des produits désassemblables, etc. au risque de diminuer les performances globales de la phase d'extraction-fabrication. Les alternatives de conception doivent être étudiées selon leurs implications pour chaque phase du cycle de vie et les choix doivent être réalisés en prenant en compte ces données. Il convient d'établir quelles sont les phases du cycle de vie les plus critiques parmi extraction-fabrication, transport, utilisation, maintenance et fin de vie afin, le cas échéant, de définir une pondération aidant à la sélection des alternatives.

Les mêmes problématiques s'appliquent au cas des impacts environnementaux. Le plus connu du grand public est l'impact représentant les émissions de CO₂ liées aux activités humaines. Il n'est pourtant qu'un parmi une multitude d'indicateurs permettant de calculer l'ensemble des conséquences des activités humaines sur l'environnement. On peut citer en exemple l'acidification des océans, l'eutrophisation, la consommation de ressources fossiles, les émissions de produits cancérigènes, etc. Là aussi, il revient à l'équipe responsable de la sélection d'alternatives de choisir judicieusement, en fonction de la stratégie d'entreprise, des attentes des clients, des réglementations, etc. un panel d'indicateurs, pondérés ou non, sur lesquels seront jugées les alternatives. Prendre en compte une multitude d'indicateurs implique une plus grande difficulté d'obtenir une solution permettant d'optimiser chacun complètement. Avec la diversité des indicateurs apparaît le risque que les moyens de les optimisés entrent en conflit : une solution permettant d'optimiser l'un des indicateurs sera peut-être au détriment des autres. Là aussi, une combinatoire et une arborescence complexe doivent être explorées afin de trouver les solutions offrant les meilleurs compromis globaux vis-à-vis de l'ensemble des indicateurs considérés.

La définition des critères d'évaluation des alternatives de conception peut largement varier selon les projets. Ils dépendent non seulement de la nature du produit mais également des profils des décideurs qui seront amenés à valider les choix d'alternatives. Des critères compréhensibles par le plus grand nombre, que cela soit au sein du personnel de l'entreprise et de ses collaborateurs comme au sein du grand public, sont à privilégier pour faciliter la compréhension, l'acceptation et l'attachement au produit. Dans le cadre des démarches d'écoconception, il est logique qu'une majorité des critères de sélection ait une dimension environnementale. Les liens avec les différentes phases du cycle de vie du produit sont aussi à privilégier.

Enfin, la compatibilité des alternatives avec les moyens de production de l'entreprise et de ses collaborateurs doit être vérifiée au plus tôt afin d'éviter un travail de conception inutile car non réalisable. Des critères représentant les aspects productiques peuvent donc être utilisés pour identifier les alternatives les plus faciles à produire.

Méthodes pour la sélection d'alternatives de conception

Durant les décennies précédentes, les processus de création de concepts et de produits innovants ont reçu une attention grandissante de la part des communautés scientifiques académique et industrielle. Si une grande partie de la littérature qui en a découlé s'est concentré sur des problématiques de fonctionnalité et d'ergonomie, une part toute aussi grande s'est intéressée à identifier les meilleures façons de concevoir les produits en améliorant leurs efficacités tout au long du cycle de vie. Pour y parvenir, la sélection des meilleures alternatives de conception par rapport à une variété de critères doit être faite de manière judicieuse. Cette section s'attarde sur le panorama des techniques et outils qui ont été développés dans le cadre de ces recherches. Cela comprend des outils célèbres tels que l'AHP et les méthodes de simulation qui ont ensuite, grâce aux puissances de calcul toujours plus grandes des outils informatiques, été automatisées pour aboutir aux outils d'optimisation actuels.

Les méthodes de conception issues de la communauté scientifique s'articulent autour de quatre tâches fondamentales du processus de conception de produits : la collecte des données, la création conceptuelle, la conception physique et la sélection des procédés de fabrication (Cavallucci et Lutz, 2000). Ici, nous nous intéressons uniquement à la tâche de conception physique, et plus spécifiquement à l'étape de sélection d'alternatives. Pour mener à bien cette étape, la méthode utilisée doit balayer rapidement un large ensemble d'alternatives en recueillant les données nécessaires à une prise de décision éclairée.

La modélisation des alternatives est une manière poussée de prendre en compte les spécificités de chacune pour arriver à un choix pertinent. L'utilisation de techniques de modélisation et de simulation n'est pas nouveauté dans le domaine de la conception de produits. Un nombre important d'études concernant la simulation ont été réalisées au fur et à mesure que de nouvelles techniques et de nouveaux logiciels se sont développés. Dominique Thiault (2007) prend l'exemple de la conception assistée par ordinateur (où la simulation de la géométrie et du comportement des pièces est devenue une pratique courante et presque indispensable) pour extrapoler le raisonnement à tous les domaines scientifiques : il prédit que dans le futur, les économistes, les experts en stratégie, etc. verront comme une évidence le fait de réaliser une modélisation du système qu'ils étudient pour en simuler le comportement et trouver les optimums d'efficacité. Parmi les précurseurs, Schroer (1989) propose un cadre méthodologique pour la modélisation de systèmes de production. Il associe ces modélisations à un outil de simulation basé sur des macros relativement simples. O'Keefe et Haddock (1991) font le constat que les entreprises ne voient pas la simulation comme une technique qui leur est accessible. Pourtant, les logiciels de plus en plus ergonomiques font que les ingénieurs, même non experts de la

modélisation et de la simulation, peuvent profiter de la puissance de ces outils. De nombreux outils sont ainsi développés pour des secteurs et des tâches spécifiques, de manière à ce que seules les données d'entrée aient à être renseignées en minimisant le travail de programmation. Cependant, une multitude de systèmes non standardisés requièrent que les interactions entre les variables soient codées manuellement. Aytug et Dogan (1998) définissent les outils de simulation comme des logiciels interactifs permettant de traduire la logique d'un modèle décrit (en langage concepteur) en code informatique qui permet à un ordinateur de mimer le comportement du modèle. Ils affirment que les outils de simulation offrent souvent des solutions efficaces et peu onéreuses aux entreprises qui désirent améliorer leur productivité, la qualité de leurs produits et leurs coûts de production. Ils pointent les inconvénients de ces techniques : les délais importants de mise en œuvre et le manque de formation des concepteurs.

Un modèle de simulation basé sur la technique AHP a été proposé par Ayag (2002) pour l'analyse et l'implémentation de systèmes assistés par ordinateur. Dans ce travail, la technique de l'AHP est utilisée pour évaluer les différentes alternatives des systèmes qui seront implémentées. En parallèle, un générateur de simulations intégré est utilisé pour réaliser une étude plus poussée et déterminer les bénéfices de chaque alternative. Ces bénéfices sont calculés par rapport à une modélisation des processus de production de l'entreprise où est conduit l'étude. Lavery et Wan (1999) développent une méthodologie pour classer les alternatives en matière de conseil pour des entreprises désirant se positionner sur de nouveaux marchés. Le cœur du problème est la gestion des risques et des incertitudes liés au choix d'une certaine alternative. La technique AHP est utilisée pour résoudre un problème de décision multi critères en utilisant des données issues de la stratégie de l'entreprise. Une approche par simulation est aussi intégrée à l'AHP pour gérer les incertitudes liées aux investissements des entreprises sur de nouveaux marchés. La combinaison de ces deux approches : AHP et simulation se montre particulièrement efficace et permet d'imaginer une transition au domaine de la conception de produits où l'AHP est souvent utilisé seul. L'AHP ne fait pas totalement consensus au sein de la communauté scientifique et ses lacunes ont été pointées par plusieurs auteurs. Le fait que les comparaisons entre critères puissent relever de décisions empiriques, sans données précises et sans cadre théorique strict est le principal point noir selon Dyer (1990). Cependant, les travaux de Perez (1995) montrent que les résultats obtenus par l'application de l'AHP n'en sont pas moins valides et exploitables dans une grande majorité de cas. En pratique, l'AHP est utilisé par une grande variété d'acteurs : entreprises, gouvernements, administrations, etc. C'est une technique de sélection d'alternatives qui a été montrée viable par un grand nombre d'applications (Cagno et al., 1997). Il est également beaucoup utilisé dans l'industrie sur les problèmes de conception (Scott, 2002).

L'AHP a été développé par Saaty (1990) pour aider à résoudre les problèmes de décision. La méthode a ensuite été modifiée pour correspondre spécifiquement aux problèmes de décision en conception par Marsh et al. L'AHP fait partie de ce que l'on peut appeler les méthodes de sélection d'alternatives. Ces méthodes existent en différentes variations dans la littérature. On trouve par exemple celles

basées sur la *utility theory* (utilisant des fonctions d'utilité) qui a dans un premier temps été développée pour l'aide à la décision dans le cadre de problèmes d'ordre économique. On la trouve maintenant dans nombre de problèmes de conception. Son principe est de réaliser un mapping des variables de conception sur l'ensemble de leurs plages de valeurs possibles. Les solutions sont obtenues par l'application d'une « fonction d'utilité » (*utility function*) (Pahl et Beitz, 1984). Les solutions peuvent alors être comparées à la liste des exigences de conception et le choix peut être fait quant à la plus pertinente. Cette méthode a été améliorée par des auteurs tels que Thurston et al. (1994) qui se sont penchés sur l'optimisation de la fonction utilité et Reddy et Mistree (1992) qui se sont penchés sur la gestion des incertitudes inhérentes à l'application de la méthode.

Des méthodes graphiques ont aussi été développées, notamment par Pugh (1991) qui propose une matrice permettant de croiser les différents concepts-solutions avec un ensemble de critères de décision, ce qui donne un outil simple et rapide à mettre en œuvre. Cette méthode montre rapidement ses limitations par le manque de résultats numériques concernant les importances de chaque alternative. Elle est souvent vue comme un premier filtre pour écarter les alternatives les moins pertinentes avant l'application d'outils plus lourds (Ayag, 2005).

Le *Quality Function Deployment* (QFD) peut aussi être cité parmi les méthodes de sélection d'alternatives. Les caractéristiques de conception placées dans les colonnes de la Maison de la Qualité doivent en effet être choisies relativement aux exigences clients qui constituent les lignes de la matrice. La plupart des méthodes permettent la prise en compte de plusieurs critères pour parvenir à une décision. Le QFD illustre bien ce principe avec les différents items de notation utilisés pour classer les besoins clients entre eux. Il ne permet pas en revanche d'obtenir une évaluation numérique de l'interconnexion des éléments entre eux, c'est à dire comment le niveau d'un besoin ou d'une caractéristique peut influencer le niveau d'un autre besoin ou d'une autre caractéristique. C'est pourtant un point qui peut être crucial étant donné que le choix d'une technologie peut verrouiller une grande partie des choix de conception restants (King et Sivaloganathan, 1999). La technique du QFD est l'une des plus connues pour traduire les besoins exprimés par les clients en caractéristiques techniques du produit. La méthode de l'AHP peut être utilisée pour hiérarchiser ces besoins clients mais également pour sélectionner les caractéristiques techniques les plus pertinentes lorsque plusieurs sont concurrentes. En comparant chaque aspect des alternatives deux à deux, une mesure précise de la performance de chacune peut être obtenue, représentée par un score en points. L'adjonction de l'AHP au QFD présente donc l'avantage de fournir un résultat quantitatif concernant les besoins clients et les caractéristiques techniques, ce qui n'est pas le cas lorsque l'on applique la méthode QFD traditionnelle qui est principalement qualitative. Dans la pratique, le QFD associé à l'AHP est à utiliser dès lors qu'un certain niveau de précision est requis ; dans le cas contraire, le QFD seul est souvent suffisant (Wang et al., 1998). Dans le cadre d'une démarche d'éco-optimisation, il est souhaitable de travailler avec des modèles présentant une précision (un réalisme) suffisant. L'emploi de l'AHP pour la sélection d'alternatives en vue de leur modélisation semble donc cohérent.

Lorsque les indicateurs discrets ne permettent pas le choix d'une alternative, le concept de logique floue peut être utilisé. Cette dernière consiste à définir différents degrés de satisfaction des conditions. Le premier outil de logique floue appliqué à la conception de système a été développé par Thurston et Carnahan (1992). Ce type de méthode se révèle souvent longue à mettre en œuvre et complexe d'utilisation de par le besoin de déterminer les équations mathématiques qui régissent les degrés de satisfaction et permettent d'obtenir les solutions. En phase de conception, nous savons qu'il est difficile d'établir a priori des modèles mathématiques précis à cause de l'importance des incertitudes (Wang et Shan, 2007). Ces méthodes sont donc peu adaptées aux phases de conception préliminaires.

Hazelrigg (2003) réalise un état de l'art des techniques de sélection d'alternatives appliquées à la conception de produits et en fait une étude critique (voir la liste des techniques étudiées dans le tableau 1). L'étude des avantages et inconvénients de ces techniques lui permet de formuler 10 propriétés permettant d'assurer la fiabilité et la pertinence de toute technique de sélection d'alternative :

1. fournir un classement des alternatives de conception ;
2. ne pas engendrer de préférence envers certaines alternatives ;
3. permettre la comparaison d'alternatives en prenant en compte les incertitudes et risques liées au cycle de vie du produit ;
4. être indépendante du secteur industriel d'application ;
5. toujours sélectionner la même alternative dans le cas où la liste d'alternatives viendrait à se réduire ;
6. être insensible à l'ordre dans lequel les alternatives sont considérées ;
7. ne pas induire de solutions technologiques concernant la conception et les procédés ;
8. ne pas réduire l'utilité/attractivité des alternatives dans le cas de l'ajout d'une alternative supplémentaire ;
9. attribuer une utilité positive à toute information supplémentaire apportée au processus de décision ;
10. être robuste et logique, ne pas entraîner de situation paradoxale ou contradictoire.

L'auteur classe les techniques étudiées en fonction des propriétés recherchées pour les outils de sélection d'alternatives comme montré dans le tableau 1 ci-dessous (où O signifie « valide la propriété et X signifie « semble valider la propriété »).

Tableau 23
Propriétés des méthodes de conception

	Propriété (tirées de la liste précédente)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Somme pondérée	X			O	O	O	O	O		X
Physical programming	X	X		O	O	O	O	O		X
AHP	X			O		O	O			
Matrice de Pugh	X			O			O			
QFD	X			O	O	O	O	O		

Loss function	X	X	O	O	O	O	O	X
Axiomatic design	X		O	O	O		O	
Six sigma	X		O	O	O		O	X

Le tableau montre qu'aucune des techniques de sélection traditionnelles ne satisfait l'ensemble des propriétés. Les trois obtenant les meilleurs résultats sont le *physical programming*, la *loss function* et la somme pondérée. Hazelrigg nous met en garde quant à l'utilisation de ces méthodes qui doit être faite en connaissance de cause et avec une interprétation juste des résultats, fonction des propriétés de la technique utilisée. Il ne propose pas de méthode satisfaisant la totalité des propriétés listées.

Des techniques poussées de modélisation et d'optimisation ont plus récemment été mises en œuvre afin d'effectuer une « comparaison paramétrée » des alternatives de conception ; c'est-à-dire comparer les alternatives entre elles alors que certains de leurs paramètres évoluent lors de l'optimisation du système. Il en résulte une comparaison des alternatives précise vu qu'elles sont testées dans une multitudes de configurations différentes mais réalistes. Tchertchian et al. (2014) appliquent une telle méthode à la conception d'une navette maritime hybride afin de déterminer les choix optimaux quant à sa motorisation et à sa propulsion ; un certain degré de liberté était laissé dans la modélisation des cycles d'utilisation de la navette (le solver pouvait y faire varier certains paramètres tels que la vitesse maximale) afin d'ajuster la solution technique à son utilisation optimale.

Les outils de sélection d'alternatives que nous venons de citer ont pour but de réduire le nombre de concepts-solutions qui seront enrichis dans les phases de conception détaillée suivantes. Cependant, dans notre démarche d'éco-optimisation de produit qui fait l'objet de cette thèse, nous cherchons à comparer plusieurs alternatives à un niveau de détail suffisamment élevé permettant de prendre en

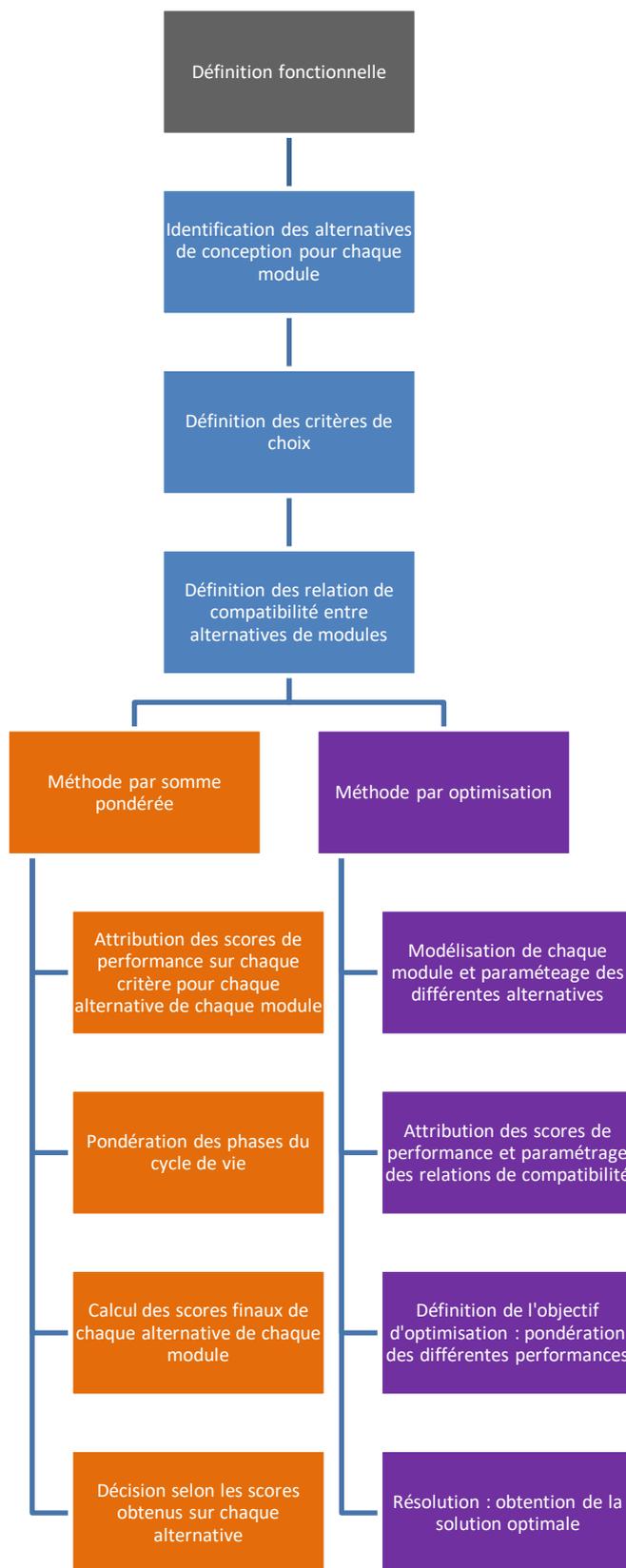


Fig. 55. Comparaison des méthodes somme pondérée et optimisation

compte leurs interactions ainsi que l'ensemble de leurs impacts sur le cycle de vie du produit. C'est également ce que préconisent Srinivasan et al. (1997) après s'être posé la question : « combien d'alternatives doivent être portées au stade de conception détaillée ? ». Ils concluent qu'il est souvent intéressant de détailler précisément plusieurs alternatives tant que cela reste possible en matière de ressources et de temps disponible.

Protocole expérimental

Le but de notre travail est de formaliser la manière d'obtenir une sélection d'alternatives pertinente pour réaliser une modélisation d'une précision nécessaire à l'aboutissement d'une démarche d'optimisation appliquée à la conception d'un produit ; l'objectif étant d'obtenir cette modélisation en y consacrant un temps et une quantité de travail minimaux. Pour ce faire, nous proposons de comparer deux approches différentes : l'une empirique où le concepteur se fie à des techniques simples et à son expérience, l'autre cadrée, basée sur des techniques d'optimisation permettant d'explorer la combinatoire complexe liée à la multitude des alternatives et aux interrelations qui existent entre les différents modules du produit.

La première méthode, la plus intuitive, est basée sur une comparaison d'indicateurs attribués à chaque alternative de chaque module. Une technique de type « somme pondérée », qui a l'avantage d'être la plus simple des techniques comparées dans le

tableau 1 tout en étant performante, est utilisée pour comparer les alternatives entre elles. Nous proposons de comparer les alternatives selon les performances des phases de leur cycle de vie. Sont donc comparées deux à deux les phases d'extraction-fabrication, transport, utilisation, maintenance et fin de vie. Une pondération est attribuée à chacune des phases afin de représenter leur importance relative par rapport à l'ensemble du cycle de vie. Concernant les aspects environnementaux, nous proposons de ne raisonner qu'en utilisant un indicateur de type « score unique environnemental » afin que des estimations rapides puissent être faites par les experts présents au sein de l'équipe de conception. Nous proposons en plus d'utiliser un critère « faciliter à produire » pour évaluer la difficulté de fabrication de chaque alternative les unes par rapport aux autres. Un critère économique est également proposé.

Cette méthode intuitive est comparée à une méthode innovante utilisant une technique d'optimisation sur le principe du CSP. Dans cette dernière, une modélisation du produit et des alternatives de conception est réalisée. Les indicateurs de décision sont attribués à chacune des alternatives. Etant donné que la puissance de calcul de l'outil permet d'explorer une combinatoire beaucoup plus grande que dans le cas de la première méthode. Nous proposons ici d'utiliser quatre catégories de dommages environnementaux différentes (tirées de la méthode de calcul IMPACT2002+) : changement climatique, impacts sur la santé humaine, impact sur les écosystèmes et épuisement des ressources fossiles.

Expérimentation

Présentation du cas

Nous appliquons la méthode au cas de la reconception d'une annexe gonflable de bateau. L'entreprise porteuse du projet vise à réduire drastiquement le poids et l'encombrement du produit tout en conservant un prix de vente constant et en réduisant les impacts environnementaux. Pour cela, différentes pistes sont disponibles : utiliser un tissu innovant, plus léger, pour la structure de l'annexe, modifier l'architecture pour diminuer les quantités de matériaux utilisées, repenser les accessoires (siège, panneau arrière, sol, bande de ragage, dames de nage...)... De nombreuses alternatives de conception sont donc disponibles et des choix éclairés doivent être faits pour atteindre les objectifs posés.

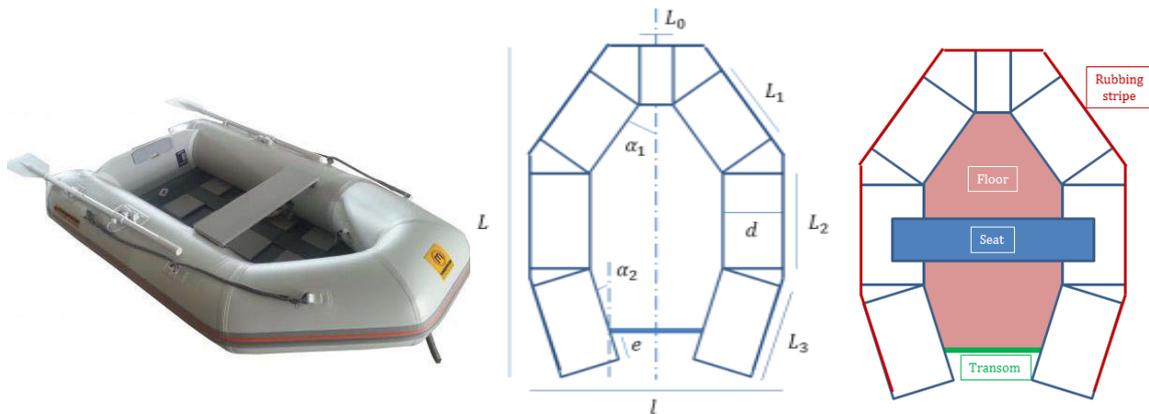


Fig. 56. From left to right: picture of the dinghy, architectural variables and parts included in the optimization

La modification de l'architecture de l'annexe, liée à de nombreuses contraintes normatives et présentant une infinité de solutions possibles, rend pertinente l'utilisation d'une technique d'optimisation afin de déterminer l'architecture optimale du produit. La modélisation peut non seulement prendre en compte l'architecture mais également tout élément ayant une importance pour les performances du produit au long de son cycle de vie. Etant donné que nous nous trouvons dans le cadre d'une démarche d'écoconception, nous focaliserons les indicateurs de performance sur des critères environnementaux.

Quelle que soit la méthode de conception utilisée, la première étape du travail est l'identification des alternatives de conception. Elle est réalisée par un groupe élargi d'experts en relation avec la conception du produit. Ce groupe met en relation des chercheurs en matériaux composites, des chercheurs en écoconception, des experts marketing, des designers, des responsables de la stratégie de l'entreprise et des ingénieurs chargés de missions variées au sein de l'entreprise. Soit chacun de leur côté, soit ensemble, ils proposent une série d'alternatives respectant un cahier des charges précis concernant le ou les sous-systèmes dont ils ont été chargés. Les techniques d'idéation et d'élaboration des alternatives ne font pas l'objet de notre travail et ne sont donc pas détaillées ici.

Le tableau 2 ci-dessous regroupe pour chaque module principal de l'annexe les différentes alternatives qui ont été identifiées comme pertinentes par les experts.

Tableau 24
Description des alternatives de conception

Module	Alternative	Description
Tissé	PVC 1100 g/m ²	Tissu polyester (400g/m ²) enduit PVC (700 g/m ²), utilisé traditionnellement sur les annexes.
	PVC 600 g/m ²	Tissu polyester (160 g/m ²) enduit PVC (440 g/m ²) allégé
	PVC 400 g/m ²	Tissu polyester (120 g/m ²) enduit PVC (280 g/m ²) avec pré imprégnation du tissu en phase aqueuse.

	TPU 600 g/m ²	Tissu polyester (160 g/m ²) enduit polyuréthane (440 g/m ²), actuellement non utilisé sur ce type de produits.
	TPU 400 g/m ²	Tissu polyester (120 g/m ²) enduit polyuréthane (280 g/m ²).
	Hypalon 1200 g/m ²	Matériau multicouche avec tissu polyester, primaire d'adhésion, néoprène et couche de protection extérieure.
Sol	Lattes bois	Lattes de contreplaqué marine peintes, 15 mm d'épaisseur, 20 cm de largeur.
	Lattes composite	Lattes composite résine polyester et fibre de verre, 18 mm d'épaisseur, 20 cm de largeur.
	Gonflable	Tissé 3D (même composition que le tissé retenu choisi pour la structure avec adjonction d'une structure intérieure en fils de polypropylène pour obtenir un matelas rigide une fois gonflé).
Panneau AR	Bois	Panneau de contreplaqué marine avec peinture, 18 mm d'épaisseur.
	Composite plein	Panneau composite résine polyester et fibre de verre, 22 mm d'épaisseur.
	Composite pliable	Panneau composite résine polyester et fibre de verre, 22 mm d'épaisseur, articulé pour réduire l'encombrement du produit une fois plié.
	Gonflable	Structure tissé 3D, même composition que le tissé du sol gonflable.
Siège	Bois	Panneau de contreplaqué avec peinture, 18 mm d'épaisseur.
	Composite	Panneau composite résine polyester et fibre de verre, 22 mm d'épaisseur.
	Gonflable	Boudin gonflable réalisé avec le tissé choisi pour la structure, pas d'armature intérieure.

Chacune des alternatives est ensuite examinée au travers des critères de sélection. Chaque module du produit dispose d'un jeu de critères spécifique élaboré par l'équipe de conception sur la base des attentes des clients, de la concurrence, de la stratégie d'entreprise, etc. Les méthodes telles que le QFD peuvent être utilisées pour élaborer ces jeux de critères. Le tableau 3 rassemble les critères choisis pour la comparaison des alternatives de chaque module de l'annexe gonflable (à noter que dans la méthode « optimisation », les impacts environnementaux sont représentés par quatre catégories alors que seul le score unique est utilisé dans la méthode « somme pondérée »).

Tableau 25
Indicateurs de performance des alternatives par phase du cycle de vie

	Extraction-fabrication	Transport	Utilisation	Maintenance	Fin de vie
Tissé	Facilité de fabrication	Poids	Durée de vie, robustesse	Besoins en nettoyage et réparation	Etat des filières de fin de vie
	Coût	Coût			Coût
	Impacts environnementaux	Impacts environnementaux			Gains environnementaux

Sol	Facilité de fabrication	Poids, encombrement	Confort, Encombrement, Entretien.	Besoins nettoyage réparation	en et	Etat des filières de fin de vie
	Coût	Coût				Coût
	Impacts environnementaux	Impacts environnementaux				Gains environnementaux
Panneau	Facilité de fabrication	Poids, encombrement	Robustesse, Encombrement, Entretien.	Besoins nettoyage réparation	en et	Etat des filières de fin de vie
	Coût	Coût				Coût
	Impacts environnementaux	Impacts environnementaux				Gains environnementaux
Siège	Facilité de fabrication	Poids, encombrement	Confort, Encombrement, Entretien.	Besoins nettoyage réparation	en et	Etat des filières de fin de vie
	Coût	Coût				Coût
	Impacts environnementaux	Impacts environnementaux				Gains environnementaux

Enfin, la dernière étape avant d'appliquer les méthodes de sélection d'alternatives est l'identification des interrelations existant entre chaque alternative. Pour ce faire, une matrice des relations est élaborée. Elle confronte les alternatives deux à deux (une alternative d'un module contre une alternative d'un autre module) et permet de définir les conséquences de leurs associations parmi la liste suivante :

- conséquence positive (+, ++ ou +++): l'association des alternatives engendre des conséquences positives (économies d'échelle, facilité d'assemblage, compatibilité matériaux, etc.) ;
- conséquence négative (-, -- ou ---) : l'association des alternatives engendre des conséquences négatives (difficulté d'assemblage, incompatibilité matériaux, etc.) ;
- obligation unilatérale (\leftarrow ou \uparrow) : le choix de l'une des alternatives entraîne l'obligation du choix de l'autre mais l'inverse n'est pas vrai ;
- obligation bilatérale (=) : le choix de l'une des alternatives entraîne l'obligation du choix de l'autre et réciproquement ;
- interdiction (\emptyset) : le choix de l'une des alternatives interdit le choix de l'autre.

L'équipe de conception parcourt la matrice des relations et, d'un commun accord, soit sur simple expertise, soit par des recherches quant aux caractéristiques techniques des alternatives, attribue une relation à chaque paire d'alternative pertinente.

Tableau 26
Matrice de compatibilité des alternatives iner-modules

		TISSÉ					SOL			PANNEAU AR				
		PVC 1100 g/m ²	PVC 600 g/m ²	PVC 400 g/m ²	TPU 600 g/m ²	TPU 400 g/m ²	Hypalon 1200 g/m ²	Lattes bois	Lattes composite	Gonflable	Contreplaqué marine	Composite plein	Composite pliable	Gonflable
SOL	Lattes bois													
	Lattes composite													
	Gonflable	+	+	+										
PANNEAU AR	Contreplaqué marine													
	Composite plein													
	Composite pliable													
	Gonflable	+	+	+			∅	∅	↑					
SIÈGE	Bois						+				+			∅
	Composite							+				+	+	∅
	Gonflable	+	+	+										←

La matrice des relations ci-dessus met en avant les bénéfices de minimiser le nombre de matériaux différents. Elle accorde des valeurs + aux alternatives proposant l'utilisation de matériaux identiques pour les différents modules de l'annexe. Cela va dans le sens de l'optimisation de la fin de vie du produit qui est d'autant plus simple qu'il y a une homogénéité des matériaux qui le composent. Elle met aussi en avant l'intérêt d'une continuité technologique des modules. Par exemple, le panneau arrière qui soutient le moteur de l'annexe peut être réalisé avec un élément gonflable très rigide une fois en pression grâce à une structure interne « 3D », ce qui permet d'économiser du volume au pliage. Si cette solution complexe est mise en œuvre, il ne faut alors pas annuler ses bénéfices par l'adoption de solutions rigides pour les modules « siège » et « sol ». La matrice impose donc les alternatives « gonflables » pour ces deux derniers modules au cas où la solution « gonflable » serait retenue pour le module « panneau arrière ». Cette obligation est unilatérale car les solutions gonflables des modules « sol » et « siège » sont beaucoup plus courantes que celle appliquée au module « panneau arrière » et présentent un intérêt suffisant à être mises en œuvre même seules.

Une fois la matrice remplie, tous les éléments sont rassemblés pour mettre en œuvre les méthodes de sélection d'alternatives.

Méthode de sélection par somme pondérée

Dans cette première méthode, la parole des experts présents dans le groupe de conception doit suffire à fournir les éléments nécessaires à l'attribution des scores pour chaque case du tableau 27. Dans le cas contraire, des études plus précises peuvent être réalisées au cas par cas (ACV simplifiées, Analyse des coûts, étude de marché, etc.). Le tableau 27 rassemble pour l'ensemble des alternatives un condensé des avis émis par l'équipe de conception de l'annexe gonflable. Hormis les impacts environnementaux des différentes alternatives de tissés qui ont nécessité une ACV complémentaire, l'ensemble des cases a été rempli par voie de concertation entre experts compétents.

Les aspects les plus favorables sont coloriés en vert alors que les plus négatifs le sont en rouge. Pour la suite du processus, chaque critère de chaque alternative reçoit une note de 1 à 5 suivant sa couleur (les scores les plus bas étant considérés être les meilleurs) (tableau 28).

Cette première étape ne permet de comparer les alternatives que sur chaque phase du cycle de vie prise indépendamment. Elle ne fait pas ressortir les éventuelles différences d'importances attribuées à chaque phase. Afin de représenter cela, nous proposons d'utiliser la technique de l'AHP pour comparer les phases du cycle de vie deux à deux et attribuer à chacune une pondération (tableau 29). Etant donné que cette pondération n'est pas nécessairement la même pour les différents composants et modules du produit (certains seront par exemple très importants en phase d'usage et l'utilisation se verra donc fortement pondérée ; pour d'autres, on cherchera surtout à optimiser la phase de fabrication, etc.), nous laissons la possibilité de reproduire l'opération pour chaque module et ainsi d'attribuer à chacun une pondération spécifique des phases du cycle de vie.

Les scores des critères sont finalement multipliés par les coefficients de pondération des phases correspondantes pour obtenir les scores finaux représentant les importances relatives de chaque alternative sur chaque critère et sur chaque phase du cycle de vie (tableau 30).

En faisant les sommes ligne par ligne des scores finaux, il apparaît quelles sont les alternatives les plus performantes en fonction des critères choisis et de leurs importances (tableau 30).

Tableau 27
Avis émis pour chaque indicateur et chaque phase du cycle de vie

		Extraction-fabrication	Transport	Utilisation	Maintenanc ce	Fin de vie
Tissé	PVC 1100 g/m ²	Filières robustes en place, fournisseurs connus de l'entreprise.	Poids élevé.	Tissé ayant fait ses preuves depuis de nombreuses	Peu de maintenance à prévoir : nettoyage	Filières de recyclage en émergence mais peu implantées

		Coût moyen.	Coût fort	années. Grande espérance de vie. Bonne résistance aux UV et produits chimiques.	occasionne l, rustinages, recollages et autres réparation s peu probables.	Coût élevé
		Fort IE.	IE fort			Gains environnement aux forts
PVC 600 g/m ²		Facilement réalisable par les fournisseurs des filiales existantes.	Poids moyen.	Pas de retours d'expérience.	Maintenan ce à prévoir : nettoyage	Filiaires de recyclage en émergence mais peu implantées
		Faible coût.	Coût moyen	Tests de résistance	occasionne l, rustinages, recollages et autres réparation s assez probables.	Coût élevé
		IE moyen.	IE moyen	concluants, espérance de vie moyenneme nt amoindrie. Bonne résistance aux UV et produits chimiques.		Gains environnement aux forts
PVC 400 g/m ²		Facilement réalisable par les fournisseurs des filiales existantes.	Poids faible.	Pas de retours d'expérience.	Maintenan ce à prévoir : nettoyage	Filiaires de recyclage en émergence mais peu implantées
		Faible coût.	Coût faible	Tests de résistance	occasionne l, rustinages, recollages et autres réparation s fortement probables.	Coût élevé
		IE faible.	IE faible	concluants, espérance de vie fortement amoindrie. Bonne résistance aux UV et produits chimiques.		Gains environnement aux forts
TPU 600 g/m ²		Nécessité d'adapter les procédés de production.	Poids moyen.	Pas de retours d'expérience.	Maintenan ce à prévoir : nettoyage	Filière de recyclage inexistante
		Coût moyen.	Coût moyen	Tests de résistance	occasionne l, rustinages, recollages et autres	Coût pressenti élevé
		IE faible.	IE moyen	concluants, espérance de vie		Pas de gains environnement aux

				équivalente au produit traditionnel. Très bonne résistance aux UV et produits chimiques.	réparations assez probables.	
	TPU 400 g/m ²	Nécessité d'adapter les procédés de production.	Poids faible.	Pas de retours d'expérience. Tests de résistance concluants, espérance de vie moyennement amoindrie. Très bonne résistance aux UV et produits chimiques.	Maintenance à prévoir : nettoyage occasionnel, rustinages, recollages et autres réparations fortement probables.	Filière de recyclage inexistante
		Coût moyen.	Coût faible			Coût pressenti élevé
		IE très faible.	IE faible			Pas de gains environnementaux
	Hypalon 1200 g/m ²	Filières robustes existantes.	Poids élevé.	Tissé ayant fait ses preuves depuis de nombreuses années. Très grande espérance de vie et résistance aux UV et produits chimiques.	Très peu de maintenance à prévoir : nettoyage occasionnel, rustinages, recollages et autres réparations très peu probables.	Filière de recyclage inexistante
		Coût élevé.	Coût fort			Coût pressenti élevé
		IE très fort.	IE fort			Pas de gains environnementaux
ISO	Lattes bois	Solution traditionnelle, filières robustes en place, fournisseurs connus de l'entreprise.	Poids moyen, encombrant	Peu confortable, encombrant, peu d'entretien	Très peu de maintenance et nettoyage à prévoir	Filières de fin de vie robustes
		Coût faible	Coût moyen			Coût faible
		IE faible	IE moyen			Gains environnementaux faibles

	Lattes composite	Solution innovante, nécessité de recherche de fournisseurs/produits adaptés	Poids faible, encombrant	Peu confortable, encombrant, aucun entretien	Très peu de maintenance et nettoyage à prévoir	Pas de filière de fin de vie soutenable
		Coût moyen	Coût moyen			
		IE moyen	IE moyen			
	Gonflable	Solution existante, filières robustes en place, fournisseurs connus de l'entreprise.	Poids moyen, peu encombrant	Très confortable, peu encombrant, peu d'entretien	Très peu de nettoyage, rustinages en cas de besoin	Pas de filière de fin de vie soutenable
		Coût moyen	Coût faible			
		IE fort	IE faible			
Panneau AR	Contreplaqué marine	Solution traditionnelle, filières robustes en place, fournisseurs connus de l'entreprise.	Poids moyen, encombrant	Très robuste, encombrant, peu d'entretien	Très peu de maintenance et nettoyage à prévoir	Filières de fin de vie robustes
		Coût faible	Coût moyen			
		IE faible	IE moyen			
	Composite plein	Solution innovante, nécessité de recherche de fournisseurs/produits adaptés	Poids faible, encombrant	Bonne robustesse, encombrant, aucun entretien	Très peu de maintenance et nettoyage à prévoir	Pas de filière de fin de vie soutenable
		Coût moyen	Coût moyen			
		IE moyen	IE moyen			
	Composite pliable	Solution innovante, nécessité de recherche de	Poids moyen, peu encombrant	Robustesse satisfaisante, peu encombrant	Très peu de maintenance et nettoyage à prévoir	Pas de filière de fin de vie soutenable

		fournisseurs/produits adaptés		, aucun entretien		
		Coût moyen	Coût faible			
		IE moyen	IE faible			Pas de gains environnementaux
	Gonflable	Solution existante, filières robustes en place, fournisseurs connus de l'entreprise.	Poids moyen, peu encombrant	Robustesse satisfaisante, très peu encombrant, peu d'entretien	Très peu de nettoyage, rustinages en cas de besoin	Pas de filière de fin de vie soutenable
		Coût moyen	Coût faible			
		IE fort	IE faible			Pas de gains environnementaux
Siège	Bois	Solution traditionnelle, filières robustes en place, fournisseurs connus de l'entreprise.	Poids moyen, encombrant	Peu confortable, encombrant, peu d'entretien	Très peu de maintenance et nettoyage à prévoir	Filières de fin de vie robustes
		Coût faible	Coût moyen			Coût faible
		IE faible	IE moyen			Gains environnementaux faibles
	Composite	Solution innovante, nécessité de recherche de fournisseurs/produits adaptés	Poids faible, encombrant	Peu confortable, encombrant, aucun entretien	Très peu de maintenance et nettoyage à prévoir	Pas de filière de fin de vie soutenable
		Coût moyen	Coût moyen			
		IE moyen	IE moyen			Pas de gains environnementaux
	Gonflable	Solution existante, filières robustes en place, fournisseurs connus de l'entreprise.	Poids moyen, peu encombrant	Très confortable, peu encombrant, peu d'entretien	Très peu de nettoyage, rustinages en cas de besoin	Pas de filière de fin de vie soutenable
		Coût moyen	Coût faible			

		IE fort	IE faible			Pas de gains environnementaux
--	--	---------	-----------	--	--	-------------------------------

Tableau 28
Conversion des avis en scores

		Extraction-fabrication	Transport	Utilisation	Maintenance	Fin de vie
Tissé	PVC 1100 g/m ²	2	4	2	2	2
		3	4			4
		4	4			2
	PVC 600 g/m ²	2	3	3	3	2
		2	3			4
		3	3			2
	PVC 400 g/m ²	2	2	4	4	2
		2	2			4
		2	2			2
	TPU 600 g/m ²	3	3	2	3	4
		3	3			4
		2	3			4
	TPU 400 g/m ²	3	2	3	4	4
		3	2			4
		1	2			4
Hypalon 1200 g/m ²	2	4	1	1	4	
	4	4			4	
	5	4			4	
Sol	Lattes bois	1	4	4	2	2
		2	3			2
		2	3			2
	Lattes composite	3	3	4	1	4
		3	3			3
		3	3			4
	Gonflable	1	1	1	2	4
		3	1			3
		4	1			4
□	Contreplaqué marine	1	3	3	1	1

		2	3			2
		2	3			2
	Composite plein	3	3	3	1	4
		3	3			4
		3	3			4
	Composite pliable	3	2	2	1	4
		3	2			4
		3	2			4
	Gonflable	1	2	2	2	4
		3	2			4
		4	2			4
Siège	Bois	1	3	4	1	1
		2	3			2
		2	3			2
	Composite	3	3	4	1	4
		3	3			4
		3	3			4
	Gonflable	1	2	1	3	4
		3	2			4
		4	2			4

Tableau 29

Détermination des pondérations relatives à chaque phase du cycle de vie par la méthode AHP

		EF	T	U	M	FdV	Pondération	Eigen	Lambda max	Consistency
Tissé	EF	1,00	7,00	3,00	7,00	3,00	3,38	0,49	5,08	0,02
	T	0,14	1,00	0,33	1,00	0,14	0,37	0,05	5,19	0,05
	U	0,33	3,00	1,00	3,00	1,00	1,25	0,18	5,03	0,01
	M	0,14	1,00	0,33	1,00	0,33	0,44	0,06	5,03	0,01
	FdV	0,33	7,00	1,00	3,00	1,00	1,48	0,21	5,24	0,06
							6,91	1,00	5,12	0,03
		EF	T	U	M	FdV	Pondération	Eigen	Lambda max	Consistency
Sol	EF	1,00	7,00	0,33	0,33	1,00	0,95	0,14	8,41	0,85
	T	0,14	1,00	0,14	0,14	0,14	0,21	0,03	6,18	0,29
	U	3,00	7,00	1,00	1,00	3,00	2,29	0,33	8,22	0,81
	M	3,00	7,00	1,00	1,00	3,00	2,29	0,33	8,22	0,81

	FdV	1,00	7,00	0,33	0,33	1,00	0,95	0,14	8,41	0,85
							6,69	0,97	7,89	0,72
		EF	T	U	M	FdV	Pondération	Eigen	Lambda max	Consistency
Panneau AR	EF	1,00	7,00	3,00	7,00	3,00	3,38	0,49	5,08	0,02
	T	0,14	1,00	0,33	1,00	0,14	0,37	0,05	5,19	0,05
	U	0,33	3,00	1,00	3,00	1,00	1,25	0,18	5,03	0,01
	M	0,14	1,00	0,33	1,00	0,33	0,44	0,06	5,03	0,01
	FdV	0,33	7,00	1,00	3,00	1,00	1,48	0,21	5,24	0,06
							6,91	1,00	5,12	0,03
		EF	T	U	M	FdV	Pondération	Eigen	Lambda max	Consistency
Siège	EF	1,00	7,00	3,00	7,00	3,00	3,38	0,49	5,08	0,02
	T	0,14	1,00	0,33	1,00	0,14	0,37	0,05	5,19	0,05
	U	0,33	3,00	1,00	3,00	1,00	1,25	0,18	5,03	0,01
	M	0,14	1,00	0,33	1,00	0,33	0,44	0,06	5,03	0,01
	FdV	0,33	7,00	1,00	3,00	1,00	1,48	0,21	5,24	0,06
							6,91	1,00	5,12	0,03

Tableau 30
Calcul des scores de performances finaux

		Extraction-fabrication	Transport	Utilisation	Maintenance	Fin de vie	Cycle de vie
Tissé	Pondération	3,38	0,37	1,25	0,44	1,48	
	PVC 1100 g/m ²	6,76	1,47	2,49	0,87	2,95	50
		10,14	1,47			5,90	
		13,52	1,47			2,95	
	PVC 600 g/m ²	6,76	1,11	3,74	1,31	2,95	44
		6,76	1,11			5,90	
		10,14	1,11			2,95	
	PVC 400 g/m ²	6,76	0,74	6,23	2,18	2,95	46
		6,76	0,74			5,90	
		10,14	0,74			2,95	
	TPU 600 g/m ²	10,14	1,11	2,49	1,31	5,90	52
		10,14	1,11			5,90	
		6,76	1,11			5,90	
	TPU 400 g/m ²	10,14	0,74	3,74	1,75	5,90	52

		10,14	0,74			5,90		
		6,76	0,74			5,90		
	Hypalon 1200 g/m ²	6,76	1,47			5,90	61	
		13,52	1,47			5,90		
		16,90	1,47	1,25	0,44	5,90		
Sol	Pondération	0,95	0,21	2,29	2,29	0,95		
	Lattes bois	0,95	0,84	9,16	4,58	1,90	26	
		1,90	0,63			1,90		
		1,90	0,63			1,90		
	Lattes composite	2,85	0,63	9,16	2,29	3,80	32	
		2,85	0,63			2,85		
		2,85	0,63			3,80		
	Gonflable	0,95	0,21	2,29	4,58	3,80	26	
		2,85	0,21			2,85		
		3,80	0,21			3,80		
	Panneau AR	Pondération	3,38	0,37	1,25	0,44	1,48	
Contreplaqué marine		3,38	1,11	3,74	0,44	1,48	32	
		6,76	1,11			2,95		
		6,76	1,11			2,95		
Composite plein		10,14	1,11	3,74	0,44	5,90	56	
		10,14	1,11			5,90		
		10,14	1,11			5,90		
Composite pliable		10,14	0,74	2,49	0,44	5,90	53	
		10,14	0,74			5,90		
		10,14	0,74			5,90		
Gonflable		3,38	0,74	2,49	0,87	5,90	50	
		10,14	0,74			5,90		
	13,52	0,74	5,90					
Siège	Pondération	3,38	0,37	1,25	0,44	1,48		
	Bois	3,38	1,11	4,98	0,44	1,48	33	
		6,76	1,11			2,95		
		6,76	1,11			2,95		
	Composite	10,14	1,11	4,98	0,44	5,90	57	
		10,14	1,11			5,90		
		10,14	1,11			5,90		
	Gonflable	3,38	0,74	1,25	1,31	5,90	50	
		10,14	0,74			5,90		
		13,52	0,74			5,90		

Méthode par optimisation

Nous proposons ici l'utilisation d'une approche d'optimisation par satisfaction de contraintes afin d'obtenir une sélection optimale d'alternatives au regard des différents critères de décision considérés.

Le principe est de réaliser une modélisation du système produit-alternatives qui pourra être utilisée par un logiciel solver afin d'y trouver les solutions optimales. Le problème y est représenté par un ensemble de variables ayant chacune leur domaine de valeurs possibles. Ces variables sont liées entre elles par des expressions et des contraintes qui structurent la modélisation. Ces éléments sont présentés dans le tableau 31. En pratique, la modélisation est écrite en langage C++ en utilisant une bibliothèque spécialement conçue pour réaliser des programmes d'optimisation.

Tableau 31

Liste des variables, domaines, contraintes et objectifs qui composent la modélisation du système

Modules	Variables	Domaines (dimensions en cm)	Contraintes	Objectif
Tissé	Type de tissé (des coefficients d'impact par quantité de matière sont associés à chaque type)	{PVC1100 ; PVC600 ; PVC400 ; TPU600 ; TPU400 ; Hyp1200}		
Architecture	Largeur totale Longueur totale Angle proue Longueur flotteur Surface sol Volume total Surface totale Masse tissé Diamètre flotteur Ligne d'eau Longueur comp0 Longueur comp1 Longueur comp2 Largeur panneau Masse cargo	[0 ; 200] [0 ; 400] [0 ; 90] Libre Libre Libre Libre Libre [30 ; 60] [0 ; 20] [0 ; 50] [0 ; 200] [0 ; 200] [0 ; 100] Libre	Contraintes architecturales (expressions des surfaces et volumes grâce aux variables) Contraintes réglementaires (masse transportable en fonction du volume total, rapport longueur/largeur, rapport longueur/nombre de passagers, volume de flottabilité de sécurité)	
Siège	Type	{Bois ; Composite ; Gonflable}		
Panneau AR	Type	{Bois ; Composite ; Composite pliable ; Gonflable}		

Sol	Type	{Bois ; Composite ; Gonflable}		
Annexe	Tissé Architecture Siège Panneau Sol			Maximiser les performances globales. Maximiser la compatibilité entre les modules.

Chacune des alternatives citées précédemment fait l'objet d'une modélisation. Pour les différents modules, les alternatives se caractérisent par des matériaux différents et donc des coefficients de performances (massique, environnementaux, etc.) différents. L'architecture de l'annexe est le cœur

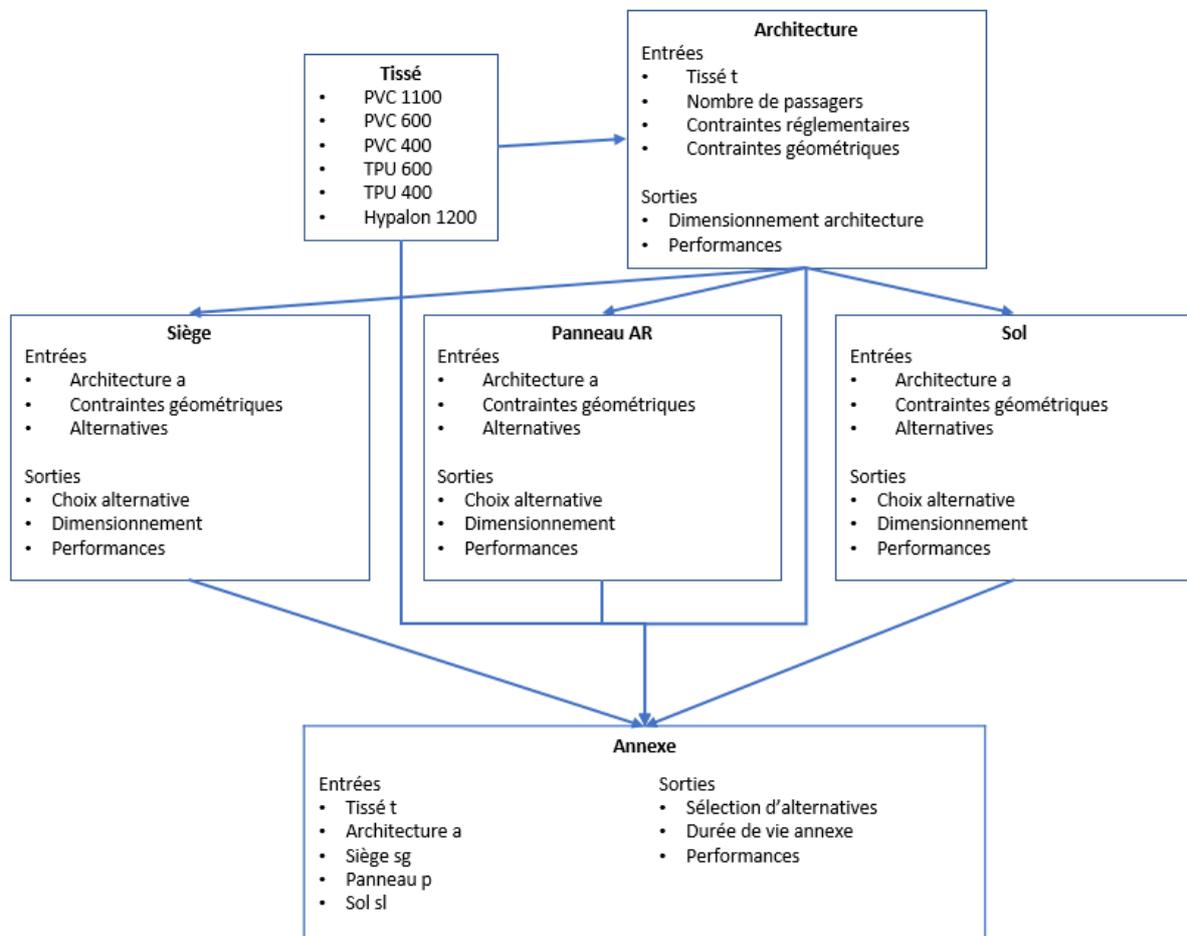


Fig. 57. Représentation des modules de modélisation

de la modélisation où sont mis en relation les différents modules. Elle est modélisée en se basant sur les normes et réglementations en vigueur et sur les contraintes physiques liées au fonctionnement du produit. La quantité de tissu utilisée, de même que les contraintes géométriques des autres modules (qui permettront d'obtenir les valeurs de performance), découlent des variables du module « architecture ». L'objectif est d'obtenir, grâce à l'algorithme de recherche d'optimum, un paramétrage des variables de conception permettant de respecter les normes tout en utilisant un

minimum de matières dans les différents modules. Finalement, obtenir les meilleures performances revient à trouver le paramétrage idéal d'un ensemble de modules en interaction les uns avec les autres, sachant que plusieurs alternatives sont à comparer pour chacun des modules.

La figure 55 explicite les liens entre les différents modules du produit qui sont chacun modélisés par un module de code. Le premier module « tissé » définit les alternatives quant au choix du tissé, en fournissant pour chaque alternative les performances de chaque critère de décision (impacts environnementaux, masse, durée de vie...). Le module « architecture » permet de calculer le dimensionnement idéal de l'annexe vis-à-vis des contraintes réglementaires en vigueur ; il permet de calculer les quantités de tissé nécessaires à la fabrication du produit. Les modules « siège », « panneau arrière » et « sol » s'appuient sur le dimensionnement du module « architecture » qui influence les dimensions de chacun de ces composants. Lors de la résolution du problème dans le but de trouver les solutions optimales, les modules ne sont pas gérés les uns après les autres comme ils viennent d'être présentés. Toutes les variables de l'ensemble des modules sont testées et évoluent simultanément afin de ne laisser aucun point de l'espace de conception inexploré.

L'extrait de code ci-dessous donne un aperçu du langage utilisé pour la modélisation. Il s'agit ici de l'expression des contraintes structurant l'architecture de l'annexe.

```
//Expressions architecturales
mo.add( larg == lt + 2*d ); // largeur totale en cm
mo.add( alpha == IloArcSin((lt - l0)/(2*l1))); // angle de proue en degrés
mo.add( longA == l2 + l1*IloCos(alpha) + d ); // longueur totale en cm
mo.add( lf == l0 + 2*l1 + 2*l2 ); // longueur du flotteur cm
mo.add( sf == 3.14*d*d/4 ); // section flotteur cm²
mo.add( vf == (lf*sf)/1000000 ); // volume flotteur m3
mo.add( ss == l0*l1*IloCos(alpha)... // surface sol cm²
+ l1*l1*IloCos(alpha)*IloSin(alpha) + lt*l2 );
mo.add( vtot == vf/2 + (ss*d)/1000000 ); // volume flottaison total m3
mo.add( stot == ss + 3.14*d*lf ); // surface totale de tissé cm²

mo.add( aMass == stot*(t->ItisseMass)/1000000 );// masse de tissé en kg

//Contraintes architecturales et réglementaires
mo.add( 1000*vtot*9.81 >= 1800 ); // volume de flottabilité mini
mo.add( ((longA - d - e)/38) - 1 >= n ); // rapport longueur/passagers
mo.add( mMax <= 0.75*1000*vf - aMass ); // masse maxi transportable
mo.add( mMax >= n*85 ); // masse mini transportable
mo.add( z <= d/3 ); // profondeur ligne d'eau
mo.add( aMass + n*85 <=... // rapport masses/flottaison
1000*(lf*sf/4 + z*ss)/1000000 );
mo.add( larg <= 160 ); // largeur mini stabilité
```

Afin de prendre en compte la matrice des relations dans la résolution du problème, des relations sont ajoutées pour chaque case remplie de la matrice. Par exemple, pour l'obligation du choix d'une alternative, une formule telle que la suivante sera utilisée :

si (choix solution $i_{module a}$) alors (choix solution $j_{module b}$)

Concernant les conséquences positives du choix d'une certaine alternative, un score de compatibilité sera augmenté :

si (choix solution $i_{module a}$ & choix solution $j_{module b}$) alors (score += x)

De cette manière, en incluant à l'objectif d'optimisation la maximisation du score de compatibilité, le solveur cherchera, dans la mesure du possible par rapport aux autres objectifs, les solutions qui présentent les associations d'alternatives les plus positives.

Pour mettre en pratique la méthode, le problème est codé avec le logiciel Microsoft Visual Studio et la bibliothèque IBM Ilog est utilisée pour la partie satisfaction de contraintes.

Résultats

Méthode « somme pondérée »

Les résultats obtenus par l'application de la méthode donnent la sélection d'alternatives de conception suivante :

- Tissé PVC 600 g/m²
- Sol lattes bois ou gonflable (scores à égalité)
- Panneau arrière bois
- Siège bois

Dans le cadre d'une optimisation ultérieure, cette sélection de modules pourra être modélisée. La modélisation pourra inclure à la fois les solutions « lattes bois » et « gonflable » pour le module « sol » étant donné que celles-ci ont obtenu des scores identiques et présentent donc chacune un fort intérêt.

Méthode optimisation

Les résultats obtenus par la méthode optimisation sont extrêmement dépendants de la manière dont est exprimé l'objectif d'optimisation à l'intérieur du programme. En effet, le solveur ne fait pas que chercher les paramétrages des variables qui permettent de satisfaire l'ensemble des contraintes ; il lui est aussi demandé de respecter un objectif quant à la solution retenue. Cela est généralement de minimiser ou maximiser la valeur d'une variable ou d'une expression regroupant plusieurs variables. Dans notre cas, l'objectif de la démarche d'écoconception pourrait être de minimiser l'ensemble des impacts environnementaux. Cependant, cela pourrait se faire au détriment d'autres indicateurs de performance tels que la durée de vie de l'annexe (fonction de la nature et de l'épaisseur du tissu utilisé). La technique QFD peut être utilisée pour l'élaboration de l'objectif de résolution comme expliqué au chapitre précédent. Ce n'est pas le cas ici dans un souci de simplification du modèle et de focalisation sur l'aspect « sélection d'alternatives ».

Dans le cadre de l'expérimentation, nous proposons dans un premier temps de comparer deux objectifs, l'un prenant en compte la compatibilité entre les modules et l'autre non :

- OPTI 1: minimiser les impacts environnementaux (les quatre catégories pondérées également), maximiser la durée de vie de l'annexe et maximiser la compatibilité des modules ; chaque sous-objectif pondéré de manière égale ; une analyse de sensibilité sera ensuite effectuée sur la valeur de pondération de l'expression « compatibilité des produits ».
- OPTI 2: minimiser les impacts environnementaux (les quatre catégories pondérées également) et maximiser la durée de vie de l'annexe ; chaque sous-objectif pondéré de manière égale.

Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus avec les deux objectifs d'optimisation et les met en parallèle avec les données mesurées et calculées sur le produit existant.

Tableau 32
Résultats obtenus par la méthode par optimisation

		Unit	Actual dinghy	OPTI. 1	OPTI 2
Sélection			PVC 1100 g/m²	PVC 600 g/m²	TPU 600 g/m²
			Sol lattes bois	Sol gonflable	Sol lattes bois
			Panneau AR bois	Panneau AR gonflable	Panneau AR bois
			Siège bois	Siège gonflable	Siège bois
Scores	Service life	years	15	11	12
	Climate change	pts	1.12	0.81	0,74
	Ecosystem quality	pts	0.25	0.18	0,17
	Human health	pts	2.77	2.01	1,83
	Resources	pts	0.95	0.66	0,63
	Cost	pts	3.21	2.25	2,13
Dimensions	Total mass	kg	25.52	16.90	16,90
	Mass of the fabric	kg	13.30	8.81	8,81
	Tube diameter	cm	45.00	42	29,80
	Length of the tube	cm	584.0	570.0	386,74
	Floor Surface	m²	1.76	1.60	1,17
	Total volume	m ³	1.81	1.60	1,20
	Total length	cm	270.0	255.0	178,80
	Total width	cm	172.0	173.0	113,90

Nous voyons que l'OPTI 1 favorise l'association de composants fabriqués d'un même matériau : le PVC. L'OPTI 2, quant à elle, favorise uniquement les composants présentant les meilleurs rapports impacts environnementaux / durée de vie. Dans le premier cas, des bénéfices peuvent être tirés de

l'homogénéisation des matériaux : (i) en fabrication avec une optimisation des pertes et une plus grande centralisation de la production et (ii) en fin de vie où moins de désassemblage et de tris seront nécessaires.

Dans un second temps, afin d'analyser l'influence de l'expression de compatibilité des composants, nous réalisons une analyse de sensibilité sur cette dernière. Cette analyse consiste à prendre l'objectif OPTI 1 et à y modifier la valeur de la pondération de l'expression de compatibilité, d'une valeur nulle jusqu'à une valeur significativement supérieure aux autres coefficients de pondération.

En considérant que les coefficients des trois expressions qui composent OPTI 1 sont de valeur 1, la plage de variation du coefficient de pondération de l'expression de compatibilité s'étendra de 0 à 2 (l'analyse montrera qu'au-dessus de 1,1 les résultats n'évoluent plus) avec un pas de 0,1. Pour chaque cas, nous calculons les résultats en matière d'impacts environnementaux et de choix d'alternatives. Ces résultats sont représentés dans la figure 56.

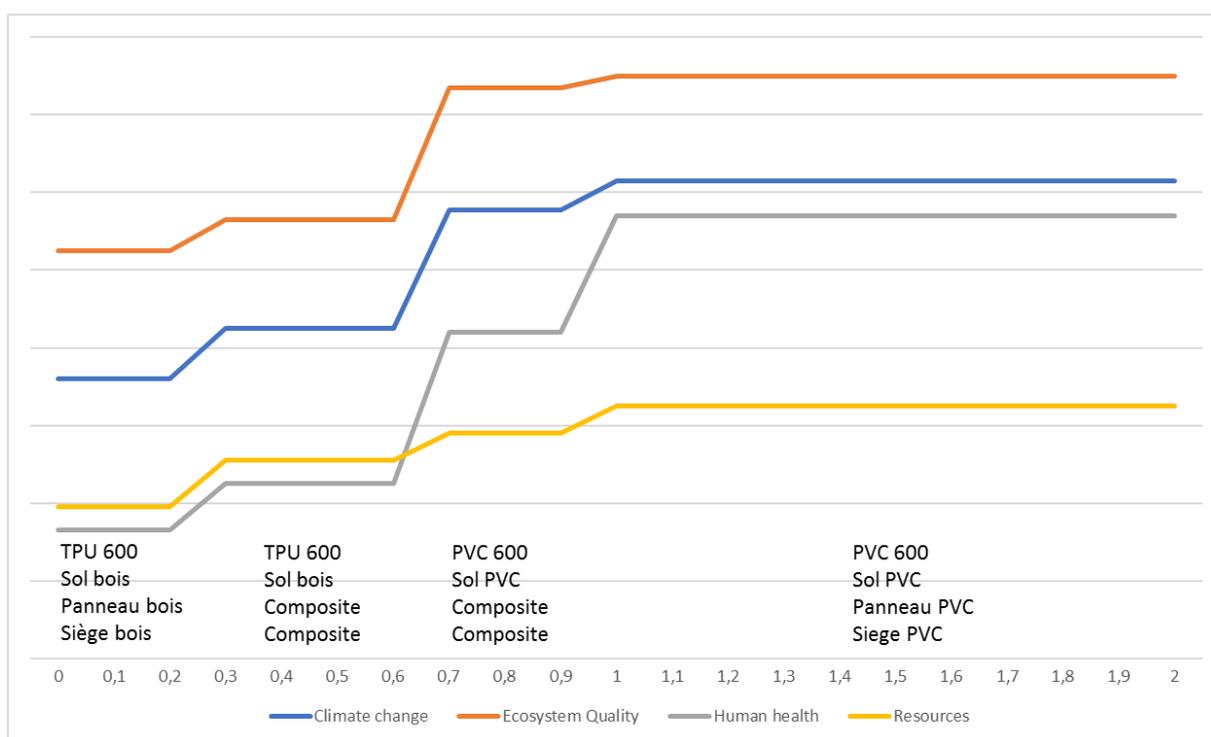


Fig. 58. Evolution des impacts environnementaux et de la sélection d'alternatives en fonction de la valeur du coefficient de pondération de l'expression de compatibilité

Selon la valeur du coefficient de pondération de l'expression de compatibilité, des paliers de valeurs sont visibles pour les impacts environnementaux du système. Ils interviennent dès lors que le score de compatibilité atteint une valeur qui oriente le choix du solveur vers un ensemble d'alternatives différent de celui sélectionné avec la valeur précédente. Nous voyons qu'entre les résultats obtenus auparavant avec les objectifs OPTI 1 et OPTI 2, deux résultats intermédiaires existent. Ils font intervenir les alternatives composites pour le panneau arrière et le siège, ce qui explicite la diversité des associations d'alternatives pertinentes au regard de la diversité des objectifs de résolution possibles.

Discussion

De par le caractère simple et adaptable de la méthode « somme pondérée », de nombreux points peuvent être soumis à discussion.

- Premièrement, le principe de la méthode est de s'appuyer en premier lieu sur la parole des experts présents au sein de l'équipe de conception. Bien qu'il soit possible de réaliser des études spécifiques à certains points de doutes, l'objectif est d'obtenir des résultats rapides par consultations et votes. Cela pose le problème de la fiabilité des résultats obtenus qui est fonction du niveau d'expertise global du groupe sur chaque domaine relatif aux critères de décision. La constitution d'une équipe compétente est donc la clé de la réussite du projet. Dans cette optique, des tests de compétences pourraient être mis en œuvre afin de déterminer si les niveaux d'expertises suffisants sont atteints par les membres de l'équipe.
- Deuxièmement, la méthode repose sur une combinaison de techniques de sélection d'alternatives déjà connues et éprouvées. Le choix a été fait, après étude de la littérature scientifique sur le sujet, de combiner la somme pondérée et l'AHP pour obtenir des scores pertinents pour chaque alternative de conception. Un grand nombre d'autres combinaisons est possible et demande à être expérimenté afin de déterminer les avantages et inconvénients de chacune.
- Avec la combinaison de techniques choisie, l'étape de colorisation et d'attribution des scores à chaque alternative peut être réalisée de plusieurs manières différentes. Alors qu'ici une échelle simple de 1 à 5 a été choisie, d'autres possibilités peuvent être expérimentées : échelles non linéaires du type 1, 3, 9, échelles allant du négatif au positif avec soustraction des points négatifs, etc. Des travaux concernant l'application pertinente de l'une ou l'autre de ces échelles sont disponibles dans la littérature scientifique et peuvent être utilisées lorsque les spécificités du problème de sélection le requièrent.

La méthode par optimisation apporte a priori des résultats fiables mais ils sont par nature dépendant de la qualité de la modélisation. Des erreurs de modélisation entraîneront des résultats faussés avec le risque de ne pas détecter les problèmes. Une attention particulière doit donc être portée à la modélisation du produit et de ses alternatives. Ensuite, un point majeur de la méthode par optimisation est la définition de l'objectif d'optimisation. Nous avons vu qu'il doit inclure les critères de performance des alternatives, le score de compatibilité, mais aussi certains indicateurs de performance liés à la conception du produit, le but de la méthode étant de réaliser une sélection d'alternatives en cohérence avec une optimisation de l'architecture et du dimensionnement du produit. Des éléments tels que l'expression de la masse totale du produit (fonction de nombreuses variables impliquées dans l'optimisation) peuvent donc être aussi inclus au sein de l'objectif d'optimisation.

La composition de l'objectif d'optimisation n'est qu'une première étape. Les éléments qui le composent doivent dans un premier temps être normalisés afin de créer une expression homogène puis, dans un second temps, pondérés afin de représenter l'importance relative de chacun au regard du cahier des charges du produit (certains indicateurs pouvant être plus importants à minimiser ou maximiser que d'autres pour des raisons stratégiques, environnementales, économiques, etc.). Nous

ne sommes pas entrés ici dans le détail de la définition de l'objectif d'optimisation, des travaux précédents ayant déjà abordé cette thématique et proposé une méthode de définition utilisant le QFD.

Conclusion

Dans cet article, nous avons élaboré et testé une méthode de sélection d'alternatives basée sur une approche d'optimisation et dédiée à l'écoconception de produit. Afin d'évaluer son efficacité, cette méthode a été comparée à une méthode traditionnelle. Cette dernière s'appuie sur une combinaison de techniques de sélection d'alternatives adaptées aux aspects de soutenabilité et de cycle de vie. Elle combine somme pondérée et AHP pour hiérarchiser les alternatives de conception avec une prise en compte indépendante des spécificités du cycle de vie de chaque module du produit. Elle permet d'obtenir une sélection d'alternatives pertinentes mais ne donne aucune information quantitative quant aux conséquences sur la conception du système

La méthode par optimisation est, quant à elle, très intégrée au processus global de conception. Elle demande un apport de données important de manière à modéliser l'ensemble des alternatives prises en compte avec une précision suffisante. En plus de la modélisation du système, les données primordiales à intégrer sont celles issues des ACV simplifiées et des autres études concernant les alternatives afin de pouvoir caractériser chacune en fonction de ses performances. Lors de la résolution, le solveur cherche à optimiser les performances globales par le choix des meilleures alternatives tout en agissant sur l'architecture et le dimensionnement global du système.

Les résultats obtenus après expérimentation de la méthode par optimisation sont concluants sur le cas de l'annexe de bateau gonflable. Ils prouvent leur intérêt par rapport à la méthode traditionnelle qui ne permet pas une prise en compte aussi efficace de la grande quantité de variables de conception. L'analyse de sensibilité réalisée sur le coefficient de pondération de l'expression de compatibilité montrent l'existence de résultats intermédiaires qui peuvent s'avérer intéressants selon les contraintes associées au cycle de vie du produit. Cette analyse devrait donc être systématique lors de l'application de la méthode. Bien que les résultats obtenus soient concluants, de plus nombreuses applications restent nécessaires afin d'obtenir les retours d'expériences permettant d'apprécier objectivement la robustesse de la méthode.

Références

- Ayag*, Z., 2005. An integrated approach to evaluating conceptual design alternatives in a new product development environment. *International Journal of Production Research* 43, 687–713.
- Ayag, Z., 2002. An analytic-hierarchy-process based simulation model for implementation and analysis of computer-aided systems. *International Journal of Production Research* 40, 3053–3073.
- Aytug̃, H., Dog̃an, C.A., 1998. A framework and a simulation generator for kanban-controlled manufacturing systems. *Computers & industrial engineering* 34, 337–350.
- Bevan, N., 1999. Quality in use: Meeting user needs for quality. *Journal of systems and software* 49, 89–96.
- Cabeza, L.F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., Castell, A., 2014. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29, 394–416.
- Cagno, E., Caron, F., Perego, A., 1997. Competitive bidding: A multi-criteria approach to assess the probability of winning, in: *Deuxieme Congress International Franco-Quebecois de Genie Industrie—ALBI*.
- Cavallucci, D., Lutz, P., 2000. Intuitive design method (IDM), a new approach on design methods integration, in: *Proceeding of ICAD2000: First International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA-June*. pp. 21–23.
- Courage, C., Baxter, K., 2005. *Understanding your users: A practical guide to user requirements methods, tools, and techniques*. Gulf Professional Publishing.
- Dominique Thiault, 2007. *Le modélisateur, de la modélisation des processus d'entreprise*, Lavoisier. ed. Antony Rowe Ltd, Chippenham.
- Dyer, J.S., 1990. Remarks on the analytic hierarchy process. *Management science* 36, 249–258.
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Bauer, C., Doka, G., Dones, R., Hischier, R., Hellweg, S., Humbert, S., Köllner, T., others, 2007. Implementation of life cycle impact assessment methods. *Ecoinvent report* 3.
- Gehin, A., Zwolinski, P., Brissaud, D., 2008. A tool to implement sustainable end-of-life strategies in the product development phase. *Journal of Cleaner Production* 16, 566–576. doi:10.1016/j.jclepro.2007.02.012
- George, M., Works, J., Watson-Hemphill, K., 2005. *Fast innovation: Achieving superior differentiation, speed to market, and increased profitability*. McGraw Hill Professional.
- Gerhard, P., Beitz, W., 1977. *Engineering Design: a systematic approach*. The Design Council.
- Hazelrigg, G.A., 2003. Validation of engineering design alternative selection methods. *Engineering Optimization* 35, 103–120.
- King, A.M., Sivaloganathan, S., 1999. Development of a methodology for concept selection in flexible design strategies. *Journal of Engineering Design* 10, 329–349.
- Klöppfer, W., 1997. Life cycle assessment. *Environmental Science and Pollution Research* 4, 223–228.
- Koen, P., Ajamian, G., Burkart, R., Clamen, A., Davidson, J., D'Amore, R., Elkins, C., Herald, K., Incorvia, M., Johnson, A., others, 2001. Providing clarity and a common language to the “fuzzy front end.” *Research-Technology Management* 44, 46–55.
- Krishnan, V., Bhattacharya, S., 2002. Technology selection and commitment in new product development: The role of uncertainty and design flexibility. *Management Science* 48, 313–327.
- Levary, R.R., Wan, K., 1999. An analytic hierarchy process based simulation model for entry mode decision regarding foreign direct investment. *Omega* 27, 661–677.
- Li, H., Azarm, S., 2000. Product design selection under uncertainty and with competitive advantage. *Journal of Mechanical Design* 122, 411–418.
- Marsh, E., 1993. Hierarchical decision making in machine design.
- O'KEEFE, R.M., HADDOCK, J., 1991. Data-driven generic simulators for flexible manufacturing systems. *The International Journal of Production Research* 29, 1795–1810.
- Pahl, G., Beitz, W., n.d. *Engineering design, 1984*. Design Council, London.
- Park, J.-H., Seo, K.-K., 2006. A knowledge-based approximate life cycle assessment system for

- evaluating environmental impacts of product design alternatives in a collaborative design environment. *Advanced Engineering Informatics* 20, 147–154.
- Pugh, S., 1991. *Total design: integrated methods for successful product engineering*. 1990.
- Reddy, R.P., Mistree, F., 1992. Modeling uncertainty in selection using exact interval arithmetic. *ASME DES ENG DIV PUBL DE, ASME, NEW YORK, NY(USA)*, 1992, 42, 193–201.
- Rödger, J.-M., Hammond, J., Brownsort, P., Dickinson, D., Loewen, A., 2016. Life cycle assessment. *Biochar in European Soils and Agriculture: Science and Practice* 184.
- Saaty, T.L., 1990. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research* 48, 9–26.
- Schroer, B.J., 1989. A simulation assistant for modeling manufacturing systems. *Simulation* 53, 201–206.
- Scott, M., 2002. Quantifying certainty in design decisions: examining AHP. CD-ROM Proceedings of the ASME IDETC.
- Srinivasan, V., Lovejoy, W.S., Beach, D., 1997. Integrated product design for marketability and manufacturing. *Journal of Marketing Research* 154–163.
- Tchertchian, N., Millet, D., Yvars, P.-A., 2014. How to Improve Environmental Performance by Negotiating Functional Specifications of Complex System? *Procedia CIRP, 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering* 15, 449–454. doi:10.1016/j.procir.2014.06.088
- Thurston, D.L., Carnahan, J.V., 1992. Fuzzy ratings and utility analysis in preliminary design evaluation of multiple attributes. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME* 114, 648–658.
- Thurston, D.L., Carnahan, J.V., Liu, T., 1994. Optimization of design utility. *Journal of Mechanical Design* 116, 801–808.
- Trott, P., 2008. *Innovation management and new product development*. Pearson education.
- Tukker, A., Eder, P., Charter, M., Haag, E., Vercalsteren, A., Wiedmann, T., others, 2001. Eco-design: the state of implementation in Europe—conclusions of a state of the art study for IPTS. *The Journal of Sustainable Product Design* 1, 147–161.
- Ulrich, K., 1995. The role of product architecture in the manufacturing firm. *Research policy* 24, 419–440.
- Vezzoli, C., Sciamia, D., 2006. Life Cycle Design: from general methods to product type specific guidelines and checklists: a method adopted to develop a set of guidelines/checklist handbook for the eco-efficient design of NECTA vending machines. *Journal of Cleaner Production, EcoDesign: What's happening?* 14, 1319–1325. doi:10.1016/j.jclepro.2005.11.011
- Wang, G.G., Shan, S., 2007. Review of metamodeling techniques in support of engineering design optimization. *Journal of Mechanical design* 129, 370–380.
- Wang, H., Xie, M., Goh, T.N., 1998. A comparative study of the prioritization matrix method and the analytic hierarchy process technique in quality function deployment. *Total Quality Management* 9, 421–430.

Chapitre 9. Discussion générale

Chacun des trois axes de recherche présentés dans ce document de thèse est discuté spécifiquement dans le chapitre qui lui est dédié. Cependant, aucune discussion générale n'y est proposée pour assurer la cohérence de la méthodologie prise dans son ensemble. Ce chapitre a pour but d'évaluer la robustesse de la méthodologie constituée des trois axes de recherche.

La question essentielle qui doit être posée lorsqu'une méthodologie nouvelle est élaborée et expérimentée sur un cas précis est celle de sa robustesse par rapport à la diversité des secteurs d'application possibles. Nous tentons ici d'évaluer les possibilités d'application de la méthodologie complète à d'autres produits et secteurs industriels.

La méthodologie prise dans son ensemble, c'est à dire incluant l'étude des dérives d'usage, la sélection d'alternatives et la modélisation et l'optimisation basées sur l'approche QFD, est dédiée aux produits touchant le consommateur "grand public" et n'est a priori pas adaptée à des schémas *business to business*. En effet, l'étude des dérives d'usage implique une diversité d'utilisateurs à catégoriser et à sonder puis observer. Dans le cadre des marchés professionnels, il existe vraisemblablement de moindres chances d'observer une grande diversité d'usages d'un produit destiné à une tâche spécifique (si on exclut les produits "grand public" aussi utilisés dans les milieux professionnels : aspirateurs, etc.). Les métiers de l'artisanat peuvent cependant offrir la diversité suffisante à l'apparition de dérives d'usage suffisantes pour justifier leur prise en compte dans le cadre de la conception ou reconception de produits dédiés.

Les parties sélection d'alternatives et modélisation-optimisation de la méthodologie présentent un caractère transversal qui permet une application dans un grand nombre de secteurs. Les techniques de sélection d'alternatives utilisées ont été choisies car elles restent indépendantes du domaine dans lequel elles sont appliquées. Le QFD peut être appliqué à une grande diversité de produits et services et l'optimisation peut être effectuée dès lors qu'un système d'équations permet de décrire le comportement du produit sur tout ou partie de son cycle de vie.

La méthodologie semble donc adaptée à une grande variété d'applications de par la transversalité des outils et techniques qu'elle utilise. Néanmoins, ces assumptions ne peuvent être confirmées que par la mise en application effective de la méthodologie sur une diversité de cas concrets. Nous invitons donc les chercheurs et ingénieurs qui lisent ces lignes à ne pas hésiter à mettre en œuvre la méthodologie et à communiquer quant aux résultats obtenus et aux conclusions formulées.

Malgré son importance capitale du point de vue de la soutenabilité environnementale des activités humaines, la question de la fin de vie des produits n'a été traitée que de manière simplifiée au cours des travaux de thèse. Bien que ses impacts aient été pris en compte grâce à l'ACV, les problématiques complexes de bouclages de flux de matériaux et d'énergies n'ont pas pu être traitées. Elles laissent

donc un vide et des perspectives de recherche très prometteuses ; notamment concernant les questions de l'intégration de ces bouclages dans la modélisation par contraintes.

Ensuite, concernant l'applicabilité de la méthodologie, un aspect non négligeable est la présence des ressources nécessaires en matière de matériel, de temps disponible, de coûts et de compétences des membres de l'équipe. L'étude des dérives d'usage suivie de la modélisation du cycle de vie du produit sont des tâches qui peuvent être très chronophages selon la complexité du système étudié. La première nécessite des enquêtes poussées sur le terrain auprès d'un grand nombre d'utilisateurs suivies d'observation plus détaillées de panels d'utilisateurs. Ces étapes demandent un investissement particulier pour être menées à bien. Les enquêtes concernant l'utilisation peuvent néanmoins être combinées aux enquêtes nécessaires au déroulement de la démarche QFD et ainsi réaliser des économies de moyens intéressantes. Ensuite, la modélisation du cycle de vie du produit, bien que réduite grâce à la sélection des alternatives pertinentes, peut prendre un temps important, fonction de la complexité du système. Ces temps dédiés à l'étude et à la modélisation se traduisent en coûts pour l'entreprise porteuse du projet. Ils sont cependant à mettre en comparaison avec les bénéfices obtenus par l'application de la méthodologie en matière d'économies d'énergies et de matières et de satisfaction des clients.

Enfin, peut être vue comme un frein la nécessité de disposer au sein de l'équipe de conception de l'ensemble de compétences variées nécessaire à l'application efficace de la méthodologie. Parmi les membres de l'équipe doivent se trouver, sinon des experts, *a minima* des personnes formées à des concepts aussi variés que la soutenabilité, le management du cycle de vie, l'évaluation environnementale, la soutenabilité des comportements des utilisateurs, etc. et aux techniques et outils d'ACV, de QFD, d'AHP, de modélisation... Les compétences à posséder et les besoins en logiciels nécessaires à l'application de la méthodologie peuvent être un frein important si les ressources de l'entreprise sont limitées. Dans le cas contraire, la méthodologie ne requiert de ne satisfaire aucune contrainte autre que celles habituellement rencontrées par les entreprises au cours de leurs projets : collecter les données auprès des clients, assembler et former une équipe de conception pertinente, mettre à disposition les outils nécessaires, etc.

Dans cette optique, l'application en entreprise de méthodologies telles que celle développée dans ce document peut être un catalyseur permettant d'apporter un surplus de compétences et d'expertise au sein de l'entreprise. En poussant les équipes de conception à s'intéresser plus en détail aux subtilités de la phase d'utilisation, à la variété des comportements et des besoins des clients, aux interrelations qui contraignent la modularité des systèmes, ces méthodologies aident finalement à former les experts qui, parce qu'ils ont, grâce à elles, compris et intégré les clés de réflexion, intégreront davantage de soutenabilité dans les activités futures des entreprises, pour le bénéfice de tous.

Chapitre 10. Conclusions et perspectives

Les évolutions sociétales et environnementales actuelles poussent les sociétés à s'orienter vers de nouveaux modes de consommation et de production. Alertés par une multitude d'indicateurs environnementaux variés : amplification des catastrophes naturelles, baisse de la productivité des sols, disparition de la biodiversité, pollution de l'air, de l'eau et effets néfastes sur la santé humaine, raréfaction des ressources naturelles et tensions géopolitiques en découlant, problèmes de gestion des déchets, pour n'en citer qu'une partie, les acteurs publics et privés cherchent les moyens de faire la transition vers un développement durable de l'humanité.

L'un des grands aspects de ce développement durable est la manière de fabriquer et utiliser, ou consommer, les produits et services dont nous avons besoin. L'écoconception est la branche récente de la recherche académique et industrielle qui s'intéresse aux impacts environnementaux liés au cycle de vie des produits et des services. La communauté scientifique qui s'y attache propose une multitude de méthodes permettant d'intégrer les aspects environnementaux au processus de conception dans le but de réduire les impacts.

Le travail réalisé au cours du doctorat consiste à s'appuyer sur les précédents travaux des chercheurs et à apporter des solutions nouvelles, rendues possibles grâce aux progrès scientifiques et techniques perpétuels, dans le but de mieux répondre au problème complexe de l'écoconception du cycle de vie des produits. Trois axes de recherche ont été définis en ce sens :

- Le premier axe de recherche est centré sur une phase particulière du cycle de vie des produits : la phase d'utilisation. Cette phase se démarque par des incertitudes fortes liées à l'usage du produit lorsque celui-ci est destiné à un client (cas du B to C). Malgré les recommandations d'usage qui peuvent être faites, il n'est pas assuré que la personne aura une utilisation optimale du produit. Lorsque cette utilisation non optimale entraîne des impacts environnementaux supplémentaires par rapport à une utilisation normale, nous proposons de la qualifier de dérive d'usage environnementale. L'étude de ces dérives et de leurs conséquences peut alors amener des informations primordiales dans le but de mettre en place des stratégies efficaces pour influencer le comportement des utilisateurs. Ces stratégies, plus ou moins intrusives et contraignantes, doivent en effet être soigneusement conçues pour être acceptées par l'utilisateur.
- Le deuxième axe de recherche aborde le cycle de vie du produit de manière plus globale et intègre les principes de l'écoconception à une méthode basée sur une approche de modélisation et d'optimisation. La réflexion est orientée sur la manière d'organiser la modélisation et la résolution du problème de manière efficace. La résolution du problème est un aspect crucial : selon l'expression de l'objectif d'optimisation, les solutions retournées par le solveur peuvent être radicalement différentes. Dans une démarche d'écoconception, les performances environnementales doivent être optimisées mais elles ne doivent pas l'être au

détriments d'aspects fonctionels importants du produit. Nous proposons donc une méthode de définition de l'objectif d'optimisation prenant en compte l'ensemble des performances importantes du cycle de vie du produit.

- Le troisième axe de travail est lui aussi centré sur le processus de modélisation utilisé lors de la conception d'un produit. Une contrainte importante de la tâche de modélisation est la grande quantité de temps qui peut être nécessaire à la réaliser. Ce temps est démultiplié si l'on veut prendre en compte l'ensemble des alternatives de conception possible pour chaque module du produit. Cependant, lorsque diverses alternatives sont possible, il est intéressant de pouvoir tester l'influence de leur choix sur le reste du système. Des relations de dépendance et de compatibilité pouvant exister entre les modules, la sélection d'alternatives optimale se trouve au sein d'une arborescence présentant une combinatoire complexe, dépassant de loin les capacités d'une équipe de conception sans outils adaptés. Nous proposons ici une méthode par modélisation et optimisation permettant de réaliser des modèles "gros grains" des alternatives de conception et des relations d'interdépendances qui les lient. Le résultat est non seulement une sélection d'alternatives mais aussi un paramétrage de l'ensemble du système afin d'obtenir les meilleures performances.

Contributions et limites

Les contributions et les limites des travaux réalisés pendant la thèse sont les suivantes :

- Une méthode d'identification et de quantification des dérives d'usages environnementales liées aux utilisations d'un produit par différents segments d'utilisateurs. Cette méthode permet de tirer des conclusions quant aux conséquences des incertitudes liées à la diversité des usages sur les performances environnementales globales du cycle de vie du produit (incluant la durée de vie du produit comme l'une de ces performances). La méthode permet de définir un instantané de l'utilisation d'un produit par ses utilisateurs. Elle ne donne pas d'indication sur le choix des stratégies d'intervention idéales pour corriger les comportements non optimisés.
- Une étude sur la pertinence des stratégies d'intervention permettant d'influencer le comportement des utilisateurs et de l'orienter vers des pratiques écoresponsables. Y sont notamment comparés les impacts environnementaux additionnels créés par l'intégration au produit des composants permettant de mettre en oeuvre la stratégie et les impacts environnementaux évités par ladite stratégie. Cette étude est réalisée pour le cas d'un produit commercialisé sur lequel est greffé, pour les besoins de l'expérimentation, un module permettant la mise en oeuvre de la stratégie d'intervention. L'étude ne porte pas sur l'intégration des stratégies en phase de conception de produits. Les effets d'une telle stratégie intégrée étant potentiellement différents, l'étude ne propose pas de généralisation de ses résultats.

- Une méthode d'éco-optimisation pour la conception détaillée de produits, centrée sur les aspects liés aux utilisateurs pour favoriser l'attractivité du produit. La méthode inclut une démarche innovante de définition de l'objectif d'optimisation passant par la réalisation d'une démarche QFD.
- Une méthode pour la sélection d'alternatives de conception simultanée à l'optimisation globale de la modélisation d'un produit et de son cycle de vie. La simultanéité de ces deux tâches permet de réduire les incertitudes quant au choix des solutions en phase de conception amont.

Perspectives

Les outils et méthodes développés au cours du travail de thèse ont prouvé leur efficacité au cours des expérimentations menées sur les cas d'études. Cependant, afin d'assurer de la pertinence et de l'efficacité de ces méthodes, il reste nécessaire de les appliquer à une plus grande diversité de cas, d'en retirer des retours d'expériences de la part d'équipes de conception d'horizons divers et d'analyser les résultats obtenus en comparaison avec d'autres méthodes traditionnelles.

Il serait particulièrement intéressant de tester la méthodologie sur une sélection de cas présentant des degrés de complexités divers, allant de faible à fort, quant au nombre d'alternatives pour chaque module, au nombre de modules et à leurs interrelations, aux degrés de liberté des éléments de conception, aux différents scénarios de cycle de vie et notamment au niveau de la fin de vie, à la variété des pratiques d'utilisation possibles, etc. De cette manière, des conclusions pourraient être tirées de manière à identifier les familles de cas pour lesquelles l'application de la méthodologie est pertinente. Un problème de conception ne présentant qu'une faible complexité ne justifierait sans doute pas les efforts de mise en œuvre de la méthodologie mais à l'inverse, il est aussi pertinent de se demander si cette dernière peut s'appliquer à des problèmes présentant une complexité très élevée ; une combinatoire trop grande pouvant éventuellement poser problème pour la résolution par le solver. Dans ce cas, l'utilisation d'outils de réduction de modèles pourrait permettre de faciliter la résolution.

Outre la nécessité d'une plus grande diversité d'applications, une perspective des travaux menés serait le regroupement des méthodes développées au sein d'un logiciel permettant d'automatiser au maximum le processus de modélisation. Bien que les solutions d'optimisation informatiques existent déjà, elles demandent une certaine maîtrise de langages de programmation qui peut faire défaut au sein d'une équipe de conception souhaitant mettre en œuvre ces outils. Une première étape pourrait être le développement d'un langage de programmation simplifié, dédié uniquement à l'optimisation en conception de produits et à la portée de tous les ingénieurs et concepteurs. Une suite à plus long terme pourrait être un logiciel intuitif, disposant d'une base de données regroupant une grande variété de templates génériques d'éléments de conception permettant de modéliser n'importe quel problème de conception. Plus qu'au niveau logiciel, la constitution d'une telle base de données et son

enrichissement demanderait un travail important de la part de la communauté scientifique. Fait de manière collaborative, elle pourrait être un outil de partage de connaissance des plus intéressants.

Pour atteindre les objectifs des démarches d'écoconception, l'intégration dans ce logiciel d'un module ACV faciliterait l'expression des performances environnementales des différents éléments du modèle et éviterait les allers et retours entre logiciels. L'ensemble des méthodes serait alors beaucoup plus facilement accessible aux ingénieurs et concepteurs souhaitant l'expérimenter.

Publications personnelles

- Popoff, A., Millet, D., 2017. Sustainable Life Cycle Design Using Constraint Satisfaction Problems and Quality Function Deployment. *Procedia CIRP* 61, 75–80.
- Popoff, A., Millet, D., Pialot, O., 2016. A method for identifying and quantifying Usage EcoDrifts. *Journal of Cleaner Production* 137, 527–536.
- Serna-Mansoux, L., Popoff, A., Millet, D., 2014. A Simplified Model to Include Dynamic Product-User Interaction in the Eco-Design Process. *Journal of Industrial Ecology* 18, 529–544.
- Serna-Mansoux, L., Popoff, A., Millet, D., 2013. Eco-feedback performance exploration for Eco-feedback design. 21ème Congrès Français de Mécanique, 26 au 30 août 2013, Bordeaux, France (FR).

Alexandre POPOFF

COSMER, Université de Toulon

**Vers une meilleure prise en compte de l'utilisation et
des utilisateurs en écoconception : propositions
d'éléments méthodologiques pour l'enrichissement
d'une démarche d'optimisation amont**

Résumé en français

L'objectif de cette thèse est le développement d'une méthodologie d'aide à l'écoconception permettant l'optimisation multi-objectifs du cycle de vie de produits. Le premier axe de travail est focalisé sur la phase d'utilisation. Il s'intéresse à la manière dont différents segments d'utilisateurs vont utiliser un même produit et aux répercussions que vont avoir ces différentes utilisations sur les performances de son cycle de vie. Le deuxième axe vise à élaborer une méthodologie de modélisation réaliste et pertinente du cycle de vie de produits. Il est centré sur une problématique cruciale des problèmes d'optimisation : l'élaboration de l'objectif de résolution. Il propose l'utilisation de technique d'identification et de quantification des besoins clients afin de définir un objectif de résolution orientant vers les solutions de conception respectant au mieux les attentes des clients. Le troisième axe a pour but d'obtenir, par l'optimisation, une sélection d'alternatives de conception permettant de maximiser les performances du système. Une modélisation "gros grain" du produit incluant ses composants et leurs alternatives y est réalisée.

Mot clés : Ecoconception, Optimisation, Conception Centrée Utilisateur, Analyse du Cycle de Vie.

**Towards a better consideration of use and users during the ecodesign
process: proposal of methodological elements for enriching an early
optimization approach**

Résumé en anglais

The goal of the thesis is the development of an ecodesign-aid methodology for the multi criteria optimization of a product's life cycle. The first axis is focused on the use phase. It aims at understanding how a variety of users are going to use the same product in a variety of diverse ways and how these differences are going to impact negatively or positively the performances of the product's life cycle. The second axis aims at developing a life cycle modelisation method focused on realism and pertinence. It is centered around a crucial problem of every optimization exercise: the definition of the optimization objective that will guide the whole optimization process. Here is proposed the use of a technique for the identification and the quantification of the customers needs. These characterized needs are then used to define an optimization objective that favors the solutions which best respect the customer's demands. The third axis widens the scope of the product's model to include design alternatives. The goal is to better the life cycle performances through simultaneous design optimization and design alternatives selection.

Keywords: Ecodesign, Optimization, User-Centered Design, Life Cycle Analysis.