



HAL
open science

CARACTERISATION DES BONNES PRATIQUES EN ECO-CONCEPTION POUR LA FORMATION DES INGENIEURS-CONCEPTEURS : SYNTHESE DES DIMENSIONS, METHODES, ACTIVITES ET OUTILS

Flore Vallet

► **To cite this version:**

Flore Vallet. CARACTERISATION DES BONNES PRATIQUES EN ECO-CONCEPTION POUR LA FORMATION DES INGENIEURS-CONCEPTEURS : SYNTHESE DES DIMENSIONS, METHODES, ACTIVITES ET OUTILS. Mécanique [physics.med-ph]. Université de technologie de Compiègne, 2012. Français. NNT: . tel-01447423

HAL Id: tel-01447423

<https://hal.science/tel-01447423>

Submitted on 26 Jan 2017

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.

N°d'ordre :

Ecole doctorale n° 71 : Sciences pour l'Ingénieur

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivrée par

L'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE COMPIEGNE

SPECIALITE MECANIQUE AVANCEE

Présentée et soutenue publiquement par

FLORE VALLET

le 11 octobre 2012

CARACTERISATION DES BONNES PRATIQUES EN ECO-CONCEPTION POUR LA FORMATION DES INGENIEURS-CONCEPTEURS : SYNTHÈSE DES DIMENSIONS, METHODES, ACTIVITES ET OUTILS

Directeur de thèse : **Benoît EYNARD**

Co-directeur de thèse : **Dominique MILLET**

JURY

M Emmanuel CAILLAUD, Professeur, Université de Strasbourg	Rapporteur
M Bernard YANNOU, Professeur, Ecole Centrale de Paris	Rapporteur
M Benoît EYNARD, Professeur, Université de Technologie de Compiègne	Directeur de thèse
M Dominique MILLET, Professeur, SUPMECA, Toulon	Co-directeur de thèse
M Philippe GIRARD, Professeur, Université de Bordeaux	Examineur
Mme Nadège TROUSSIER, Maître de Conférences, HDR, Université de Technologie de Compiègne	Examineur
M Tim McALOONE, Associate Professor, PhD, Technical University of Denmark	Examineur

RESUME

Devant la pression exercée au niveau mondial sur le milieu naturel, l'évolution des pratiques professionnelles des concepteurs vers plus de respect des contraintes d'environnement est une condition impérative. Il est aujourd'hui nécessaire d'assurer aux concepteurs une formation initiale dans le domaine de l'éco-conception. Notre approche consiste à caractériser les bonnes pratiques de l'éco-conception afin de créer une passerelle entre concevoir et éco-concevoir des produits et services. Nous construisons à cet effet un référentiel d'activité multi-niveaux à 6 dimensions représentatif des thématiques à aborder. Le cœur de notre étude consiste en trois expérimentations de reconception de produits. Elles sont menées à l'aide d'outils d'éco-conception variés, permettant de mettre en lumière plusieurs dimensions caractéristiques parmi les 6: le processus d'éco-conception et ses étapes, l'intégration de parties prenantes et le niveau de remise en cause résultant du processus. Grâce à l'observation d'éco-concepteurs novices et experts, nous formalisons un ensemble de compétences déclinées sur le référentiel, que nous validons auprès d'un panel de responsables nationaux de formation à l'éco-conception. Finalement les pratiques d'éco-conception sont replacées dans le contexte de la conception pour montrer les complémentarités entre ces deux approches.

MOTS-CLES

Eco-conception, éco-activité, outils, référentiel, analyse de protocole, observation, pratiques.

ABSTRACT

Due to an increasing world pressure on natural resources, the evolution of professional practices of engineering designers towards more environmental friendliness becomes compulsory. Today it is necessary to provide engineering designers with a high-quality eco-design education. Our approach is to characterize eco-design best practices in order to build a bridge between the design and the eco-design of products and services. Within this perspective, a framework including six dimensions and associated levels, which characterize the core themes of the eco-design activity is proposed. Our main enquiry consists in three redesign experiments. The experimental work is conducted with various existing eco-design tools to highlight several eco-design dimensions: the eco-design process and its typical steps, the integration of stakeholders and the systemic level of the process. Thanks to the observation of novice and expert eco-designers, it is possible to formalize a set of eco-design competences. Those are displayed against the proposed framework, and validated by a national sample of persons in charge of eco-design curricula. Eco-design practices are eventually put back in the context of design to show their complementary character.

KEY-WORDS

Eco-design, eco-activity, tool, framework, protocol analysis, observation, practice.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier chaleureusement Benoît Eynard d'avoir accepté de diriger mes premiers pas dans le monde de la recherche et d'avoir réuni les meilleures conditions pour la réalisation de cette thèse. Je le remercie également pour le soutien et le suivi régulier de mes travaux et le lien sensible entre les mondes de la conception et de l'éco-conception qu'il a su créer.

J'adresse mes plus sincères remerciements à Dominique Millet, de qui j'ai apprécié les conseils avisés et pragmatiques ainsi que la grande exigence scientifique. J'espère que ce manuscrit reflète à sa juste valeur la qualité des échanges que nous avons pu avoir quatre années durant. En tant que chercheur, je salue l'investissement de Dominique dans la communauté d'éco-conception française et dans le réseau EcoSD.

Pour avoir accepté de faire partie du jury de thèse, je tiens à exprimer toute ma gratitude à Emmanuel Caillaud et Bernard Yannou en tant que rapporteurs, ainsi qu'à Philippe Girard, Nadège Troussier et Tim McAloone en tant qu'examineurs.

J'adresse également mes remerciements aux membres du réseau EcoSD pour leur aide et leur accompagnement lors des expérimentations organisées dans ce cadre, et plus particulièrement à Romain Allais, Yann Leroy, Christian Longet, Tatiana Reyes, Maud Rio, Benjamin Tyl.

Je remercie les collègues de l'UTC qui ont accepté d'ouvrir leur module d'enseignement à l'éco-conception, occasionnant des échanges pédagogiques de grande qualité: Anne Guénand, Nicolas Salzmann, Charles Forster, Nadège Troussier, Pascal Jollivet-Courtois. Mes remerciements aux collègues de l'axe en émergence Systèmes Intégrés en Mécanique de l'UTC, ainsi qu'à Sylvie et Muriel. Merci à Arnaud Dole, Stéphanie Glatard-Mahut, Fabien Michelin et Mourad Messaadia pour leur aide précieuse au cours de cette thèse. Je n'oublie pas le soutien organisationnel des derniers instants que je dois à Laurent Petit et Thomas Boulanger. Merci à Toby pour ses relectures avisées, à Manu pour ses conseils.

Je remercie plus personnellement André Cayol de m'avoir incitée, de longue date, à m'engager dans la recherche. Voici chose faite. Une pensée émue pour Thierry Kazazian grâce à qui j'ai découvert l'éco-conception en 1999. Ce fut une révélation à l'époque qui m'a conduite à la thèse neuf années plus tard...

Que mes parents soient remerciés pour m'avoir donné, chacun à leur façon, le goût de la recherche. Ce manuscrit est dédié à mon père, qui m'a accompagné secrètement de là où il se trouve. Ses recherches sur les formes du vivant et les systèmes complexes ont été source d'inspiration.

A François et Céleste pour leur patience et leur soutien.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	13
1. CONTEXTE ET POSITIONNEMENT	20
1.1 <i>POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE</i>	20
1.2 <i>Ingénierie de la Conception</i>	21
1.2.1 Approches fondatrices en conception	22
1.2.2 Cadres descriptifs	25
1.2.3 Etudes des pratiques de conception : influence de l'expertise.....	27
1.2.4 Assistance à la conception par les méthodes et outils.....	30
1.2.5 Synthèse : facettes de l'activité de conception.....	31
1.3 <i>Eco-conception.....</i>	31
1.3.1 Définition et terminologie	31
1.3.2 Contexte réglementaire	32
1.3.3 Contexte normatif.....	33
1.3.4 Motivations et obstacles à l'introduction de l'éco-conception en entreprise	33
1.3.5 Apprentissage en éco-conception.....	34
1.3.6 L'environnement et le développement de produits	35
1.4 <i>Problématique générale</i>	36
2. ETAT DE L'ART : LES FACETTES DE L'ACTIVITE D'ECO-CONCEPTION	38
2.1 <i>Complexité des enjeux environnementaux</i>	39
2.1.1 Cycles de vie des produits et services	40
2.1.2 Impacts, critères et indicateurs environnementaux	41
2.1.3 Parties prenantes	44
2.1.4 Synthèse : complexité des enjeux environnementaux.....	46
2.2 <i>Intégration de l'environnement par les acteurs du processus de développement de produits.....</i>	47
2.2.1 Nature évolutive des démarches d'intégration de l'environnement.....	47
2.2.2 Processus d'éco-conception.....	49
2.2.3 Acteurs du processus de développement de produits.....	52
2.2.4 Synthèse : maturité environnementale des acteurs du PDP.....	54
2.3 <i>Méthodes et outils d'éco-conception : abondance et difficulté de caractérisation</i>	54
2.3.1 Définition : méthodes et outils d'éco-conception.....	54

2.3.2	Catégorisations des méthodes et outils d'éco-conception	55
2.3.3	Exemples d'outils d'éco-conception	59
2.3.4	Typologies environnementales proposées par les outils	65
2.3.5	Utilité opérationnelle des méthodes et outils	66
2.3.6	Rôle social et cognitif des méthodes et outils.....	67
2.3.7	Complexité de mise en œuvre des outils	68
2.3.8	Synthèse : difficulté de caractérisation des méthodes et outils d'éco-conception	70
2.4	<i>Problématique détaillée</i>	72
3.	HYPOTHESES ET METHODE DE RECHERCHE	75
3.1	<i>Hypothèses de recherche</i>	75
3.1.1	Hypothèse générale : référentiel d'activité en éco-conception.....	75
3.1.2	Hypothèse 1 : Utilisation des outils d'éco-conception.....	76
3.1.3	Hypothèse 2 : Formalisation des compétences d'éco-conception	76
3.2	<i>Proposition d'un référentiel d'activité d'éco-conception</i>	76
3.2.1	Ancrage du référentiel	76
3.2.2	Sélection et caractérisation des dimensions représentatives de l'éco-conception	78
3.2.3	Dimensions liées au Processus de Développement de Produits.....	79
3.2.4	Dimensions liées à la chaîne de valeur.....	80
3.2.5	Dimensions contextuelles de l'éco-conception.....	82
3.3	<i>Construction de la méthode de recherche</i>	85
3.3.1	Préambule : revue des approches empiriques en éco-conception.....	86
3.3.2	Positionnement empirique : approche mixte	87
3.3.3	Critères de qualité de la recherche en conception	89
3.3.4	Maillage des études avec observation	89
3.4	<i>Appropriation de la méthode de recherche</i>	91
3.4.1	Etude descriptive des méthodes et outils d'éco-conception	92
3.4.2	Couverture thématique d'un cursus de formation	96
3.5	<i>Conclusion</i>	97
4.	ETUDES EXPERIMENTALES.....	99
4.1	<i>Collecte et analyse des données</i>	99
4.1.1	Collecte des données	99
4.1.2	Analyse des données.....	99

4.1.3	Systématisation de l'approche : livret expérimental	100
4.2	<i>Le cas BARBARAZ</i>	101
4.2.1	Cadrage de l'étude	101
4.2.2	Déroulement détaillé	104
4.2.3	Résultats	109
4.2.4	Discussion des résultats de l'expérimentation BARBARAZ	120
4.2.5	Limites de l'expérimentation BARBARAZ	121
4.3	<i>Le cas ASPI</i>	122
4.3.1	Cadrage de l'étude	122
4.3.2	Structuration de l'étude	123
4.3.3	Déroulement détaillé	125
4.3.4	Résultats	126
4.3.5	Discussion des résultats de l'expérimentation ASPI	133
4.3.6	Limites de l'expérimentation ASPI	135
4.4	<i>Le Cas LUMINAIRE</i>	135
4.4.1	Résultats et discussion de l'expérimentation LUMINAIRE	136
4.4.2	Limites de l'expérimentation LUMINAIRE	137
4.5	<i>Synthèse des études avec observation</i>	138
4.5.1	Mise au point d'une stratégie environnementale et recherche de solutions	138
4.5.2	Définition d'un scénario éco-fonctionnel	139
4.6	<i>Validation des résultats</i>	140
4.6.1	Outils d'éco-conception utilisés en formation	141
4.6.2	Pertinence des dimensions et niveaux du référentiel	142
4.6.3	Représentation des compétences de l'éco-concepteur	144
5.	Conclusions et perspectives	148
5.1	<i>Apports de la recherche</i>	149
5.1.1	Premier apport : un référentiel d'éco-conception utilisable en formation	149
5.1.2	Second apport : une clarification des compétences de l'éco-concepteur	150
5.2	<i>Limites et perspectives de recherche</i>	151
5.2.1	Approche expérimentale	151
5.2.2	Référentiel proposé	152
5.2.3	Formalisation des compétences	152

5.3	<i>Perspectives de formation à l'éco-conception à l'UTC</i>	154
5.3.1	Une initiation à l'éco-conception au cœur de plusieurs modules cibles d'enseignement.....	155
5.3.2	Vers un module intégrateur d'éco-conception	155
5.4	<i>Du concepteur à l'éco-concepteur : continuité ou rupture ?</i>	156
	Bibliographie.....	158
	ANNEXES.....	172

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1: CARACTERISTIQUES DE L'EXPERTISE EN CONCEPTION	30
TABLEAU 2: MOTIVATIONS ET OBSTACLES A LA MISE EN ŒUVRE DE L'ECO-CONCEPTION EN ENTREPRISE	34
TABLEAU 3: ATTRIBUTS DE DESCRIPTION DES METHODES ET OUTILS D'ECO-CONCEPTION.....	56
TABLEAU 4: EXEMPLES DE CLASSIFICATIONS DES OUTILS D'ECO-CONCEPTION.....	58
TABLEAU 5: EXEMPLES DE GUIDES D'ECO-CONCEPTION	62
TABLEAU 6: COMPARAISON DE TYPOLOGIES ENVIRONNEMENTALES DE PRODUITS	66
TABLEAU 7: CONTRIBUTION DES ETUDES EMPIRIQUES AUX DIMENSIONS DU REFERENTIEL	90
TABLEAU 8: CARACTERISATION D'UN OUTIL D'ACV GRACE AU REFERENTIEL D'ECO-CONCEPTION	93
TABLEAU 9: CARACTERISATION DE L'OUTIL ECODESIGN PILOT GRACE AU REFERENTIEL D'ECO- CONCEPTION	94
TABLEAU 10: COUVERTURE THEMATIQUE DE LA «BOITE A OUTILS POUR LE SUSTAINABLE DESIGN»	97
TABLEAU 11: CADRAGE DE L'EXPERIMENTATION BARBARAZ ADAPTE DE BLESSING & CHAKRABARTI (2009)	101
TABLEAU 12: STRUCTURATION DE L'EXPERIMENTATION BARBARAZ, ADAPTE DE BLESSING & CHAKRABARTI (2009)	104
TABLEAU 13: SYNTHESE DE L'OBSERVATION DES TROIS SESSIONS D'ECO-CONCEPTION.....	106
TABLEAU 14: PROPOSITION D'UN MODELE COLLECTIF D'ACTIVITE EN ECO-CONCEPTION.....	107
TABLEAU 15: EXTRAIT DE CODAGE DE LA SESSION ECODESIGN PILOT.....	108
TABLEAU 16: DETAIL DE L'EXPERIMENTATION BARBARAZ ADAPTE DE BLESSING ET CHAKRABARTI (2009)	108
TABLEAU 17 : CONTRIBUTION DE L'OUTIL PAR SOUS-ACTIVITE	112
TABLEAU 18: SYNTHESE DES SEQUENCES OBSERVEES DANS LA RUBRIQUE EVALUATION INITIALE (EI)	113
TABLEAU 19: DECLINAISON DES STRATEGIES ENVIRONNEMENTALES DANS LE CAS DU RASAGE.....	115
TABLEAU 20: CONCEPTS DE RASOIRS JETABLES GENERES PAR LES TROIS GROUPES	117
TABLEAU 21: CADRAGE DES PARTIES PRENANTES	129
TABLEAU 22: SOLUTIONS GENEREES PAR LES GROUPES ASPI.....	131
TABLEAU 23: POURCENTAGE D'IDEES EMISES EN FONCTION DU NIVEAU DE REMISE EN CAUSE	137
TABLEAU 24: ETABLISSEMENTS SUPERIEURS FRANÇAIS PROPOSANT UNE FORMATION A L'ECO- CONCEPTION	141
TABLEAU 25: OUTILS UTILISES DANS LES CURSUS DE FORMATION A L'ECO-CONCEPTION	142
TABLEAU 26: CARACTERISATION THEMATIQUE DES FORMATIONS NATIONALES D'ECO-CONCEPTION	143
TABLEAU 27: COMPETENCES D'ECO-CONCEPTION ISSUES DES ENTRETIENS	145

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : STRUCTURE DU MANUSCRIT.....	17
FIGURE 2 : DISCIPLINES DE RECHERCHE ABORDEES DANS LA THESE	20
FIGURE 3 : POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE DU RESEAU NATIONAL ECOSD	21
FIGURE 4 : PROCESSUS SYSTEMATIQUE DE CONCEPTION (PAHL ET AL., 2007)	23
FIGURE 5 : SOURCES DE VARIABILITE DU PROCESSUS DE CONCEPTION D'APRES EDER (2009)	26
FIGURE 6: ENTITES CARACTERISTIQUES DE LA CONCEPTION, D'APRES VISSER (2009)	27
FIGURE 7 : POINT DE VUE MIXTE ENTRE CONCEPTION ET ECO-CONCEPTION.....	37
FIGURE 8 : SOURCES BIBLIOGRAPHIQUES DE LA RECHERCHE	38
FIGURE 9 : COMPLEXITE DE LA DIMENSION ENVIRONNEMENTALE (KAZAZIAN, 2003).....	39
FIGURE 10 : COMPLEXITE DE LA DIMENSION ENVIRONNEMENTALE, ADAPTEE DE (KAZAZIAN, 2003) ..	40
FIGURE 11: IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX SELON LES AXES « ESPACE » ET « TEMPS » (KAZAZIAN, 2003).....	42
FIGURE 12 : MODE D'OBTENTION DE L'ECO-INDICATEUR EI 95 (ABELE ET AL., 2005).....	43
FIGURE 13 : PARTIES PRENANTES EN ECO-CONCEPTION ADAPTE DE BREZET & VAN HEMEL (1997) ..	45
FIGURE 14 : PERSPECTIVES TEMPORELLES DE LA DIMENSION ENVIRONNEMENTALE.....	48
FIGURE 15 : ETAPES DU PDP ET OUTILS D'ECO-CONCEPTION (LE POCHAT ET AL., 2007).....	50
FIGURE 16 : REFERENTIEL D'EVALUATION DU PROCESSUS DE CREATION DE CONNAISSANCES EN ENVIRONNEMENT, (JACQUESON, 2002).....	51
FIGURE 17 : MECANISME D'INTEGRATION GLOBALE DE L'ENVIRONNEMENT EN CONCEPTION, D'APRES REYES (2007)	52
FIGURE 18 : OUTILS D'ECO-CONCEPTION UTILISABLES EN FONCTION DU NIVEAU D'EXPERTISE (LE POCHAT, 2005).....	53
FIGURE 19 : EVALUATION D'UN REVERBERE PAR L'ECODESIGN WHEEL (LOFTHOUSE, 2009)	60
FIGURE 20 : ETAPES ABORDEES PAR LES GUIDES D'ECO-CONCEPTION	64
FIGURE 21 : CLASSIFICATION DES OUTILS D'ECO-CONCEPTION ET DE SUSTAINABLE DESIGN (TISCHNER, 2001)	69
FIGURE 22 : CLASSIFICATION DES OUTILS D'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE (BOVEA & PEREZ-BELIS, 2012)	70
FIGURE 23 : SYNTHESE DE LA PROBLEMATIQUE.....	73
FIGURE 24 : MODELE D'AIDE A LA SELECTION DES METHODES DE CONCEPTION (LAHONDE, 2010)....	77
FIGURE 25 : DIMENSIONS ENVISAGEES POUR LE REFERENTIEL D'ECO-CONCEPTION	78
FIGURE 26 : DIMENSION « MODELISATION DES CYCLES DE VIE »	79
FIGURE 27 : DIMENSION « CHOIX ET GESTION DES CRITERES ENVIRONNEMENTAUX.....	80
FIGURE 28 : DIMENSION « INTEGRATION DES PARTIES PRENANTES INDUSTRIELLES »	81
FIGURE 29 : DIMENSION « INTEGRATION DES PARTIES PRENANTES CIVILES »	82
FIGURE 30 : DIMENSION « NIVEAU DE REMISE EN CAUSE DES PRODUITS ET SERVICES »	83
FIGURE 31 : DIMENSION « GESTION DU PROCESSUS D'ECO-CONCEPTION »	84
FIGURE 32 : DIMENSIONS ET NIVEAUX ENVISAGES POUR LE REFERENTIEL D'ECO-CONCEPTION	84
FIGURE 33 : DESIGN RESEARCH METHODOLOGY (BLESSING & CHAKRABARTI, 2009).....	85

FIGURE 34 : TROIS MODES D'INTEGRATION DE DONNEES QUALITATIVES ET QUANTITATIVES, D'APRES (TASHAKKORI & TEDDIE, 2003)	88
FIGURE 35 : SYNTHESE DE L'APPROCHE EMPIRIQUE	91
FIGURE 36 : APPROPRIATION DE LA METHODE DE RECHERCHE	92
FIGURE 37 : HYPOTHESES DU CAS BARBARAZ.....	102
FIGURE 38 : EXTRAIT DU DESIGN BRIEF DE RECONCEPTION D'UN RASOIR JETABLE	103
FIGURE 39 : REPARTITION TEMPORELLE GLOBALE DES PHASES « CONTENU » ET « PROCESSUS » .	109
FIGURE 40 : REPARTITION TEMPORELLE DES ACTIVITES « CONTENU ».....	110
FIGURE 41 : SEQUENCES OBSERVEES EN EVALUATION INITIALE (EI) AVEC L'OUTIL ECODESIGN PILOT	113
FIGURE 42 : EXEMPLES DE RESULTATS GENERES PAR LES TROIS GROUPES	118
FIGURE 43 : NOTES MOYENNES DONNEES PAR LES EXPERTS AUX CONCEPTS.....	119
FIGURE 44 : HYPOTHESES DU CAS ASPI.....	123
FIGURE 45 : INSTALLATION DU GROUPE DE CONTROLE 2	125
FIGURE 46 : ETAPES DE L'EXPERIMENTATION ASPI.....	126
FIGURE 47 : IDENTIFICATION DES PROBLEMATIQUES ENVIRONNEMENTALES DE L'ASPIRATION DE POUSSIERES.....	127
FIGURE 48 : PERCEPTION DU PROCESSUS D'ECO-CONCEPTION PAR LES ETUDIANTS.....	128
FIGURE 49 : EXTRAIT DU CYCLE DE VIE DU GROUPE L1.....	129
FIGURE 50 : MATRICES MET REMPLIES PAR LES GROUPES L1 ET L2	130
FIGURE 51 : MATRICE MET MODIFIEE REMPLIE PAR LE GROUPE ST1.....	131
FIGURE 52 : MATRICE MORPHOLOGIQUE DU GROUPE « CONTROLE 2 »	132
FIGURE 53 : PROPOSITION DE CONCEPT DU GROUPE L1	133
FIGURE 54 : HYPOTHESE DU CAS LUMINAIRE	136
FIGURE 55 : VALIDATION DES RESULTATS	140
FIGURE 56 : CONSTRUCTION D'UN REFERENTIEL DE COMPETENCES EN ECO-CONCEPTION	144

ABREVIATIONS

ACV	ANALYSE DE CYCLE DE VIE
ADEME	AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAITRISE DE L'ENERGIE
AFNOR	AGENCE FRANÇAISE DE NORMALISATION
AMDEC	ANALYSE DES MODES DE DEFAILLANCE ET DE LEUR CRITICITE
DEEE	DECHETS DES EQUIPEMENTS ELECTRIQUES ET ELECTRONIQUES
DfE	DESIGN FOR THE ENVIRONMENT
DfX	DESIGN FOR X
EEA	ENVIRONMENTAL EFFECT ANALYSIS
EPI	ENVIRONMENTAL PRODUCT INDICATOR
ESQCV	EVALUATION SIMPLIFIEE QUALITATIVE EN CYCLE DE VIE
EuP	ENERGY USING PRODUCT
LCC	LIFE CYCLE COSTING
MET	MATERIAL ENERGY TOXICITY
MIPS	MATERIAL INPUT PER UNIT OF SERVICE
PDP	PRODUCT DEVELOPMENT PROCESS
PIP	POLITIQUE INTÉGRÉE DE PRODUITS
QFD	QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT
REACH	REGISTRATION, EVALUATION, AND AUTHORIZATION OF CHEMICALS
RoHS	REDUCTION OF USE OF CERTAIN HAZARDOUS SUBSTANCES
UF	UNITE FONCTIONNELLE
VHU	VEHICULES HORS D'USAGE

INTRODUCTION GENERALE

« Alors intervint l'action de la chimie naturelle ; au fond des mers, les masses végétales se firent tourbe d'abord ; puis, grâce à l'influence des gaz et sous le feu de la fermentation, elles subirent une fermentation complète. Ainsi se formèrent ces immenses couches de charbon qu'une consommation excessive doit, pourtant, épuiser en moins de trois siècles, si les peuples industriels n'y prennent garde ».

Jules Verne, « Voyage au centre de la Terre », p. 174, 1864.

« Produire sans détruire et concevoir un objet du quotidien, du plus élémentaire au plus subtil, en rendant son usage durable et sa fin assimilable par d'autres processus de vie, doit être l'aboutissement d'une réflexion globale qui prenne en compte la complexité de cette relation. Celle-ci transite par le lien qui unit l'homme à l'objet, allant de la simple survie au recueil de ses moindres désirs. Aucun savoir ne peut être négligé dans cette entreprise d'imagination et de nécessité. Mais quel en sera le point de départ ? »

Thierry Kazazian, « Il y aura l'âge des choses légères », p. 26, 2003.

OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

Née avec la révolution industrielle, la production de masse n'a cessé de croître depuis le 19^{ème} siècle. Après la seconde guerre mondiale, une nouvelle étape est franchie avec l'avènement de la société de consommation. La pression sur les ressources naturelles et les menaces écologiques qui accompagnent ce mode de consommation sont reconnues dès les années 60. Cela donne tout d'abord lieu à la mise en place d'une gestion dite « curative » des effets de la pollution, qui s'est révélée largement insuffisante. Force est alors de remonter aux causes des dégradations subies par l'environnement. Les sites de production font ainsi l'objet d'une gestion préventive afin de garantir une production plus propre. Puis ce sont les produits eux-mêmes et leur conception qui sont remis en cause dès les années 80 dans un mode de gestion intégrée avec, entre autre, l'apparition des premières démarches d'éco-conception.

En 1987 lors de la conférence de Rio, paraît le texte « Notre Avenir à tous », dit « Rapport Brundtland ». C'est à cette occasion qu'est élaborée et diffusée la notion de Développement Durable comme « *mode de développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs* » (**Brundtland, 1987**). Dans les années 90, la préoccupation est de réduire l'impact environnemental des produits et de leur mode de production tout au long du cycle de vie (**AFNOR, 2003**). Dernièrement, la question du changement climatique s'imposant sur le devant de la scène politique mondiale, des efforts considérables ont été mis en œuvre pour réduire les émissions des gaz à effet de serre, notamment par l'utilisation d'énergies renouvelables et par l'amélioration de l'éco-efficacité des produits et procédés. Cependant d'autres questions tout aussi préoccupantes apparaissent aujourd'hui : accès à l'eau potable, déforestation, réduction de la biodiversité et menace sur les éco-systèmes (**Crul & Diehl, 2009**).

Au plan économique, les échanges dans un contexte de globalisation ne peuvent rester soutenables qu'à la condition de profonds changements dans les mécanismes de l'offre (production) et de la demande (consommation) (**Crul & Diehl, 2009 ; Vezzoli & Manzini, 2008**). Il est clair que dans ce contexte socio-économique en pleine mutation, les préoccupations ne sont plus exclusivement environnementales, mais également économiques

et sociales, ce qui conduit à envisager des approches de Design for Sustainability ou de Sustainable Design. Le projet de l'ISO intitulé « Guide for Social Responsibility » est un signe fort marquant cette évolution (**AFNOR, 2010**). Il s'agit toujours de satisfaire les besoins du consommateur, mais dans une perspective impérativement plus « soutenable » pour la planète et l'humanité (**Crul & Diehl, 2009 ; Boeglin et al., 2006**). En mettant des produits sur le marché mondial, les entreprises, leur réseau de fournisseurs et partenaires ont une immense responsabilité et un rôle-clé à jouer dans ce changement de paradigme (**Papanek, 1984**).

Conscients de cet état de fait, nous conserverons cependant un point de vue principalement environnemental au cours de ce document, et resterons dans le cadre de l'éco-conception telle que définie dans la norme ISO/TR 14062 (AFNOR, 2003). Dans les entreprises, l'enjeu réside dans un changement d'état d'esprit acté au plus haut niveau hiérarchique, faisant passer la dimension environnementale du statut de contrainte (associée à un surcoût), à celui de réelle valeur, source de bénéfice et de mieux-être (**Millet, 2003**). Un tel changement d'orientation n'est possible qu'à la condition de modifications organisationnelles de l'entreprise étendue (**Baumann et al. 2002 ; Boks, 2006 ; Millet, et al., 2007**). Parmi les acteurs ayant un rôle central dans ce processus, sont souvent mis en avant les concepteurs et les équipes de conception (**Akermark, 2003 ; Lindhal, 2006**). L'objectif est que les concepteurs, encore peu familiers d'une dimension environnementale multiforme et complexe, puissent efficacement faire le lien avec le processus de développement de produit.

Une réponse attendue aurait pu être la mise au point d'une « nouvelle » méthode ou d'un outil d'éco-conception dans un nouveau contexte applicatif. La littérature regorge de méthodes et d'outils d'éco-conception, plus ou moins complexes, plus ou moins focalisés, frères ou cousins par les visions qu'ils proposent mais dont les appellations diffèrent. Chacun d'entre eux éclaire un point différent de la problématique environnementale. Nous considérons le paysage de la recherche académique et industrielle en éco-conception suffisamment fourni (voire encombré) par des outils variés pour ne pas avoir l'envie d'y ajouter un nième outil de notre facture!

La voie que nous souhaitons emprunter est autre, sous l'influence de notre formation initiale en conception mécanique et en design industriel. Nous portons d'abord notre attention sur la

compréhension de ce qui fait la spécificité de l'éco-conception, indépendamment dans un premier temps des résultats que l'on peut en obtenir. Puis nous souhaitons mieux comprendre l'utilisation des méthodes et outils d'éco-conception par les équipes projet. Les méthodes et outils d'éco-conception sont ici considérés comme des « vecteurs d'intégration » de la dimension environnementale dans l'entreprise, conduisant à une évolution de l'expertise individuelle et collective des concepteurs (**Millet, 2003**). En effet, nombreux sont les supports méthodologiques mis au point en milieu industriel et académique depuis plusieurs années, et beaucoup plus rares sont les tests réels d'utilisation de ces derniers, afin d'éclairer rigoureusement leur apport sur l'activité d'éco-conception (**Baumann, Boons & Bragd, 2002; Lindhal, 2006**). Il est nécessaire de fixer un cadre et un mode d'exploration thématique pour ces tests. Nous insisterons sur la multiplicité et les interrelations des points de vue à considérer en éco-conception, conférant à cette pratique un caractère résolument complexe. Ce travail servira de base à la co-construction future d'une formation à l'éco-conception à mener en concertation avec enseignants, industriels, membres institutionnels et associatifs.

La perspective est donc de porter un regard systémique sur des bonnes pratiques pour la construction sensible et rigoureuse d'un cursus de formation à l'éco-conception.

STRUCTURE DU MANUSCRIT

Ce travail de thèse présente une structure en cinq chapitres dont nous donnons les principaux éléments ci-dessous (Figure 1).

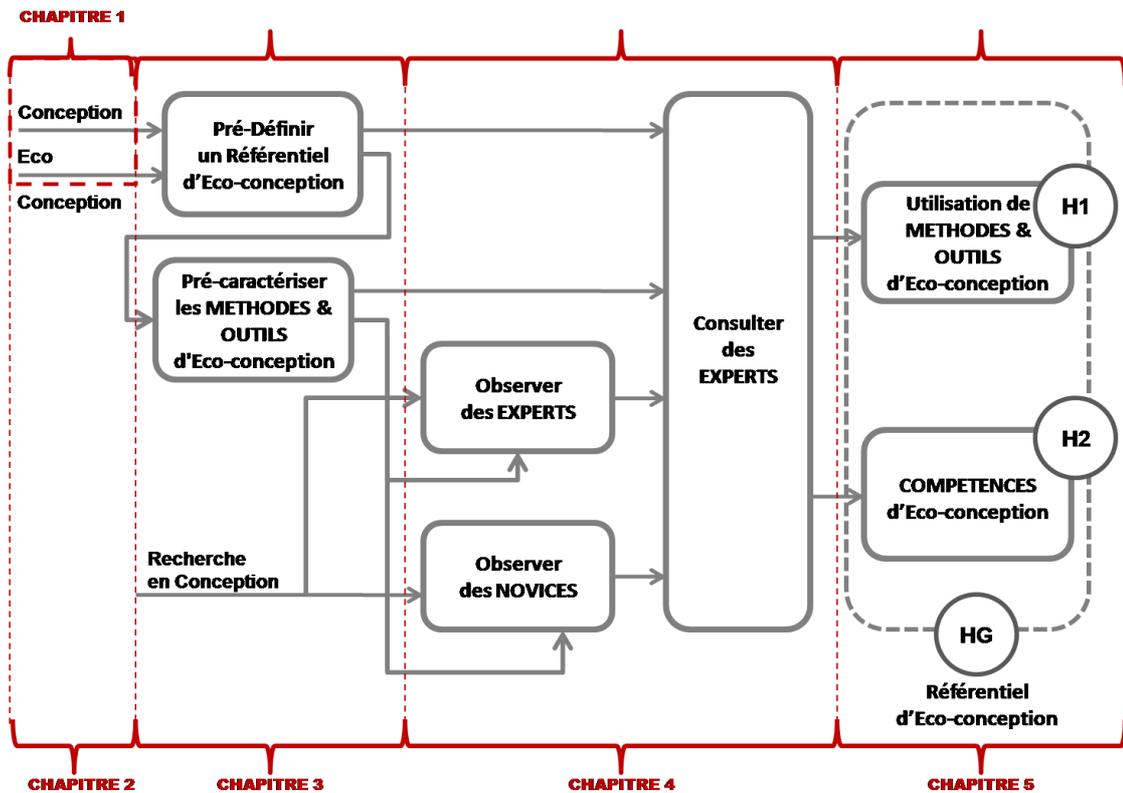


Figure 1: Structure du manuscrit

Dans le chapitre 1, nous positionnons le travail de thèse dans le champ de l'ingénierie de conception, en précisant l'état des connaissances concernant l'activité de conception. Puis nous mettons en situation l'éco-conception au plan normatif, réglementaire, et industriel.

Cela nous conduit, dans le chapitre 2, à expliciter plusieurs notions-clés posant problème lors de la pratique de l'éco-conception: la complexité des enjeux environnementaux liée au choix et à la gestion des critères d'impacts; les difficultés liées à la multiplicité des acteurs

industriels impliqués dans la démarche. Enfin, nous considérons les méthodes et outils d'éco-conception comme des médiateurs entre les enjeux environnementaux et les acteurs. Ces derniers doivent intégrer ces considérations à la conception de nouveaux produits manufacturés plus respectueux de l'environnement. Nous mettons en lumière la diversité de la couverture méthodologique offerte par les outils existants, ainsi que les manques perçus par les utilisateurs de ces outils. La problématique qui résulte de cette analyse est donc :

« Comment caractériser les bonnes pratiques de l'éco-conception pour favoriser la formation à l'éco-conception des ingénieurs de conception ? »

Dans le chapitre 3, nous proposons tout d'abord un cadre de réflexion sous la forme d'un référentiel d'éco-conception à 6 dimensions. Trois hypothèses de résolution de la question de recherche en résultent. Nous articulons les étapes de raisonnement grâce à une **hypothèse générale HG** selon laquelle **« Il est possible d'établir un référentiel d'activité en éco-conception, comprenant plusieurs dimensions indépendantes et plusieurs niveaux par dimension »**. Nous isolons ensuite deux facteurs de succès pour la caractérisation des bonnes pratiques de l'éco-conception : **l'utilisation d'outils d'éco-conception (Hypothèse H1)** et la **formalisation de compétences d'éco-conception (Hypothèse H2)**.

Les hypothèses induisent le choix d'une méthode de recherche mixte suivant trois principaux modes d'investigation : analyse bibliographique d'outils d'éco-conception, observation participative de deux catégories d'éco-concepteurs (novices et expérimentés) et entretiens de validation avec des experts. Nous faisons une première mise à l'épreuve du référentiel proposé en caractérisant un panel d'outils d'éco-conception. A la lumière de la caractérisation, huit de ces outils sont sélectionnés pour les études empiriques.

Dans le chapitre 4, nous présentons tout d'abord les résultats de l'étude empirique principale BARBARAZ. Cette expérimentation met en jeu des experts d'éco-conception qui sont amenés à utiliser divers outils dédiés. Une étude détaillée du processus d'éco-conception au moyen d'une analyse de protocole est réalisée. Le déroulement du processus d'éco-conception modélisé lors de cette étape sert de point d'entrée à la seconde expérimentation ASPI avec des novices. Cette étude sert à confirmer les traits d'expertise dévoilés par BARBARAZ et à éclairer une nouvelle dimension de l'activité de l'éco-conception. Puis le cadre du processus

est restreint à la seule phase de génération d'idées pour le cas LUMINAIRE, réalisé avec des experts. Nous en extrayons des bonnes pratiques relatives à une troisième dimension. Des entretiens conduits avec des responsables de formation à l'éco-conception valident notre proposition de référentiel et viennent enrichir les compétences que l'on a clarifié à chaque jalon expérimental.

Dans le chapitre 5, nous faisons la synthèse des éléments contributifs de la thèse, à savoir : (1) la pertinence du référentiel d'éco-conception proposé; (2) une proposition de synthèse des compétences de l'éco-concepteur par niveaux progressifs. Une part importante de ce chapitre est consacrée à la discussion des limites de la démarche de recherche. Enfin nous évoquons comment utiliser les apports de la thèse pour construire un module de formation à l'éco-conception à l'adresse des étudiants-ingénieurs de l'UTC.

1. CONTEXTE ET POSITIONNEMENT

1.1 POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE

Ce travail de recherche se positionne à l'intersection de deux disciplines principales que sont l'**ingénierie de la conception** et l'**éco-conception** (Figure 2).

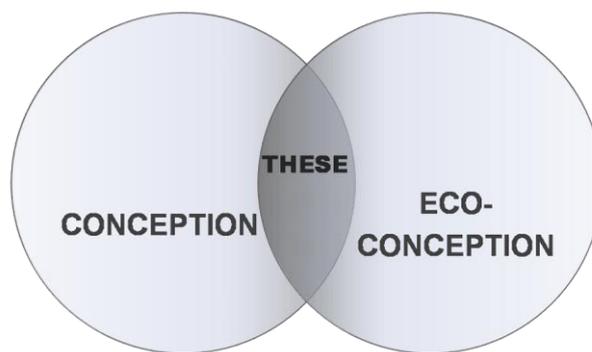


Figure 2: Disciplines de recherche abordées dans la thèse

Au plan national, nos travaux s'intègrent pleinement dans les activités menées par le Réseau National de Chercheurs en Eco-conception de Systèmes Durables (EcoSD) créée en association avec le soutien de l'ADEME en mai 2012. Un besoin de regroupement entre des universités, des grandes écoles, mais aussi des institutions et des entreprises a conduit à l'émergence du réseau. Les trois séminaires annuels EcoSD constituent des espaces de rencontre et de dialogue entre des différents acteurs français de l'éco-conception. En 2012, le réseau comprend 70 permanents environ, et une cinquantaine de doctorants rattachés aux entités partenaires. L'UTC est l'un des membres fondateurs, animateurs et organisateurs régulier des séminaires depuis 2008. L'objectif du groupe de travail est à la fois de stimuler les réflexions sur les théories de l'éco-conception, et d'apporter des perspectives pragmatiques aux entreprises en éco-conception et en développement durable. Les terrains de recherche sont constitués par des systèmes de types variés, ayant en commun un caractère

*complexe*¹ dû aux multiples interactions entre leurs dimensions. Le but est de rendre ces systèmes « durables », c'est-à-dire « soutenables ». Bien que susceptibles d'évolution, les thématiques centrales à ce jour concernent (Figure 3): l'évaluation environnementale multi-critère; la fin de vie; la production et les matériaux; les chaînes d'approvisionnement; le Product Service Systems (PSS) et l'éco-innovation.



Figure 3: Positionnement scientifique du Réseau National EcoSD

1.2 Ingénierie de la Conception

Tout au long de ce mémoire, nous souhaitons proposer une lecture de l'éco-conception ayant pour référence l'ingénierie de la conception (**Pahl et al., 2007**). Il faut préciser que la pratique de l'éco-conception incombe pour partie à des acteurs dont le métier de base est le développement de produits et services. Après avoir rappelé l'existence de grandes écoles de pensée, le but de cette section est de faire une synthèse focalisée sur:

- les cadres existants qui décrivent les dimensions techniques et humaines de la conception,

¹ Au sens défini par E. Morin, dans Introduction à la Pensée Complexe, Ed. Seuil, 2005.

- la caractérisation des pratiques individuelles ou collectives de concepteurs de niveau d'expertise variable, de novices à expérimentés.

1.2.1 Approches fondatrices en conception

La conception est une activité à la fois **rationnelle, technique et créative**. Pour en saisir toute la teneur, la recherche en conception s'est progressivement organisée autour de plusieurs courants de pensée. Dans une première phase jusqu'aux années 60, les concepteurs eux-mêmes ont retranscrit leur expérience de praticiens, en l'absence de fondements théoriques précis (**Blessing & Chakrabarti, 2009, p.3**). Les méthodes et principes structurants ont été développés dans un second temps avec un objectif de compréhension de l'activité de conception, pratiquée individuellement le plus souvent. Cette compréhension s'est naturellement ouverte à une pratique plus riche et complexe au sein des équipes de conception au début des années 90. Un nombre important d'études expérimentales ont alors été conduites (**Valkenburg & Kleinsmann, 2009**). Les points de vue et modes d'analyse des activités de conception se sont également enrichis grâce à l'apport d'autres champs disciplinaires comme la sémiotique, l'ethnographie ou la linguistique (**McDonnell & Lloyd, 2009**). Dans ce paragraphe, l'objectif est de présenter, sans volonté d'exhaustivité, quelques points de vue ayant marqué l'histoire de la recherche en conception.

1.2.1.1 Systematic Design

Le Systematic Design reflète une approche technique et méthodologique de la conception telle que décrite dans l'incontournable ouvrage de **Pahl et al. (2007)**. Le processus de conception y est découpé en quatre phases successives, auxquelles sont associés des méthodes de travail et des livrables (Figure 4): Planification and Task Clarification; Conceptual Design; Embodiment Design; Detail Design. L'avantage de l'approche réside dans la rationalisation, le phasage et le contrôle potentiel des diverses activités de conception. Cela va dans le sens de la maîtrise du temps et des coûts de développement des produits tant recherchée au plan industriel. On peut aussi y voir un intérêt en enseignement, permettant aux étudiants d'appréhender, étape par étape, les différentes dimensions de l'activité de conception.

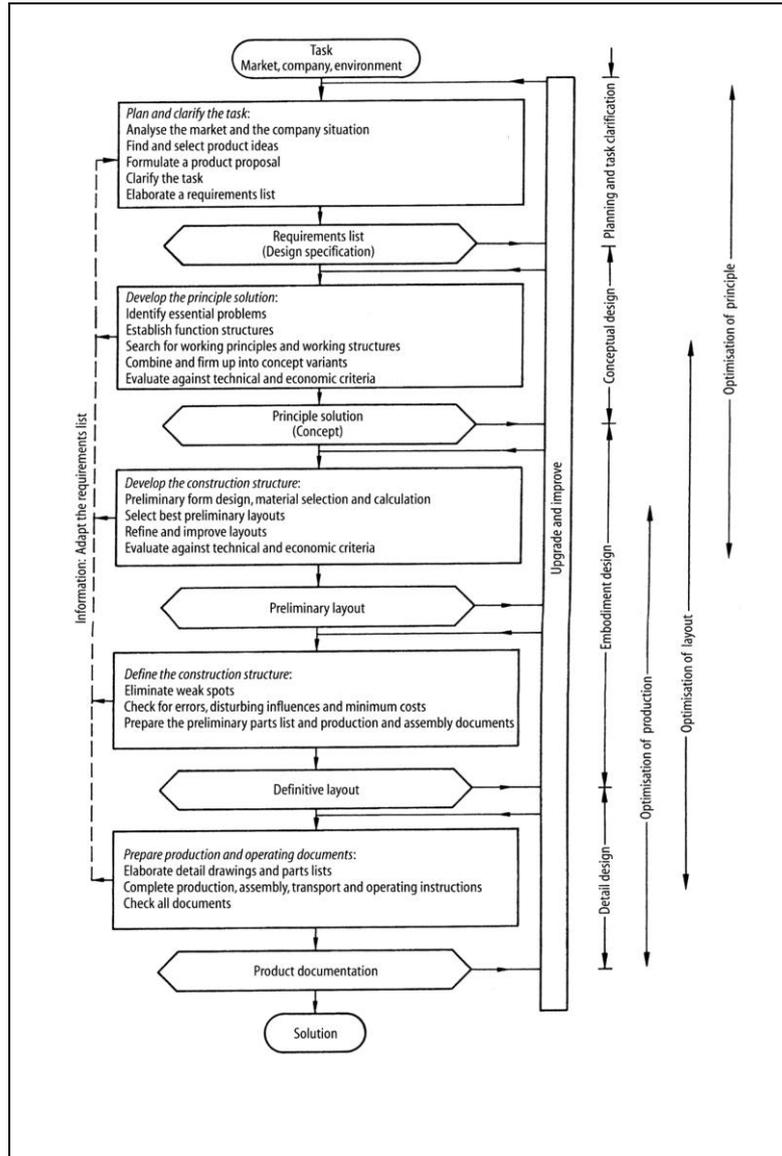


Figure 4: Processus systématique de conception (Pahl et al., 2007)

1.2.1.2 Résolution de problème

La conception peut être envisagée comme un processus de résolution de problème qualifié de mal défini (ou «ill-defined»), mal structuré mais néanmoins stable dans la vision de Herbert Simon (Simon, 1991). Les éléments structurants de la théorie de Simon sont les espaces «problème» et «solution». C'est dans ce dernier espace que les concepteurs doivent chercher une solution dite «satisfaisante» pour l'ensemble des contraintes exprimées.

1.2.1.3 Pratique réflexive

Souvent opposé à Herbert Simon dans la littérature, Donald Schön propose de considérer la conception comme une « conversation réflexive » entre le concepteur et les matériaux de la conception (**Schön, 1983**). Cela sous entend une évolution conjointe de l'espace des solutions et du problème en cours d'activité. La part artistique de l'activité est également mise en avant. Bien que restée à l'état de théorie non relayée par des méthodes ou outils, la notion de pratique réflexive a été utilisée à plusieurs reprises pour analyser des sessions de conception, validant ainsi sa pertinence (**Valkenburg & Dorst, 1998**). Le modèle de « co-évolution » entre problème et solutions se situe ainsi dans la continuité des travaux de Schön, et permet d'enrichir la compréhension de l'activité d'une dimension dynamique (**Dorst, 2001**).

1.2.1.4 Raisonnement dynamique: modèle Function Behavior Structure (FBS)

Le modèle FBS (Function Behavior Structure) (**Gero, 1990**) permet d'expliquer la nature dynamique du raisonnement des concepteurs, en identifiant cinq entités principales : des paramètres de fonction (F), de comportement espéré (Be) et réel (Bs), de structure (S) et de documentation (D). Dans sa première version, le modèle présente huit formes de raisonnement reliant ces entités, dont trois variantes de « reformulations ». Puis ce modèle est complété par un positionnement des entités non pas dans un espace unique, mais dans trois « mondes » empilés : les mondes espéré, interprété et réel. Dans ce cadre étendu, le nombre de processus identifiés entre les entités se porte à 20 (**Gero & Kannengiesser, 2004**). La force du modèle est d'une part d'apporter une compréhension de la dynamique de la conception, et d'autre part de positionner le concepteur par rapport aux projections du monde entre lesquels circulent ses réflexions.

1.2.1.5 Création de connaissances

La dernière perspective que nous retenons est défendue dans la théorie dite « C-K » (**Hatchuel & Weil, 2003**). Partant du constat que les visions centrées sur le processus ou les produits eux-mêmes sont trop réductrices, ces auteurs proposent de considérer la conception comme une circulation entre la dimension des concepts ou idées (la dimension « C ») et celle des connaissances (la dimension « K »). Autrement dit, le développement de produit

s'accompagne, selon **Hatchuel & Weil (2003)**, d'épisodes de génération d'idées qui permettent d'élargir itérativement le champ des connaissances du groupe projet. L'originalité de cette vision est de faire intervenir la notion de connaissance, en considérant le processus de conception comme un réel lieu de création de cette connaissance.

1.2.2 Cadres descriptifs

Les **activités** de conception recouvrent l'ensemble des actions et opérations effectuées par des concepteurs, qui ont pour effet de modifier les produits sur lesquels ces derniers travaillent. Les activités dites « directes » sont le « conceptual design », l'« embodiment design », la conception détaillée et le calcul, par opposition aux activités « indirectes » de collecte d'informations ou de coordination des équipes (**Pahl et al., 2007, p. 5-6**).

Nous présentons dans ce qui suit trois façons de considérer et de décrire l'activité de conception à l'aide de dimensions complémentaires, afin d'en saisir la portée à la fois technique, méthodologique et humaine.

1.2.2.1 L'approche de Eder

Dans un travail de synthèse issu de ses nombreuses années de recherche aux côtés du Pr Hubka, Eder souligne le besoin de développer une méthodologie formalisée en ingénierie de la conception (**Eder, 2009**). Du fait de la co-existence de dimensions technico-économiques, humaines et sociologiques en conception, l'auteur fait appel à la psychologie et aux sciences de l'éducation pour donner cinq points d'éclairage de l'activité (Figure 5). Nous interprétons ces éléments comme des sources de variabilités qui conditionnent l'exercice de la conception. En ce qui concerne la dimension de l'expertise, Eder (citant Dreyfus) met en place sept niveaux, du novice au visionnaire. La progression d'un niveau à l'autre est conditionnée par une autonomie et une réflexivité croissantes vis-à-vis des problèmes posés et des outils de conception utilisés (**Eder, 2009**).

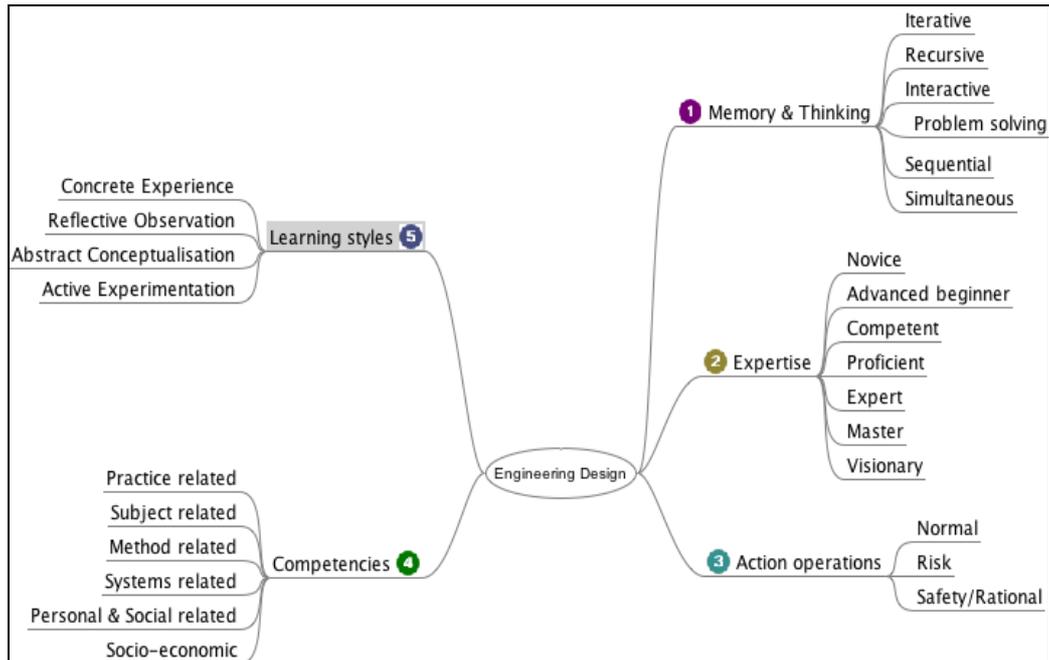


Figure 5: Sources de variabilité du processus de conception d'après **Eder (2009)**

1.2.2.2 L'approche de Visser

L'hypothèse de départ de **Visser (2009)** est que l'activité cognitive de conception présente des caractéristiques communes et unificatrices quelque soit le domaine d'application (architecture, ingénierie mécanique ou logicielle par exemple). Ce point de vue est synthétisé dans le titre de l'article: «*Design : one, but in different forms* ». Aux questions sur la caractérisation de la conception « Qui, quoi et comment ? », l'auteur répond par la proposition d'un modèle descriptif à trois entités principales : Concepteur, Artefact et Processus (Figure 6). L'avantage de cette description est de présenter le concepteur au cœur de l'activité (**Visser, 2009**).

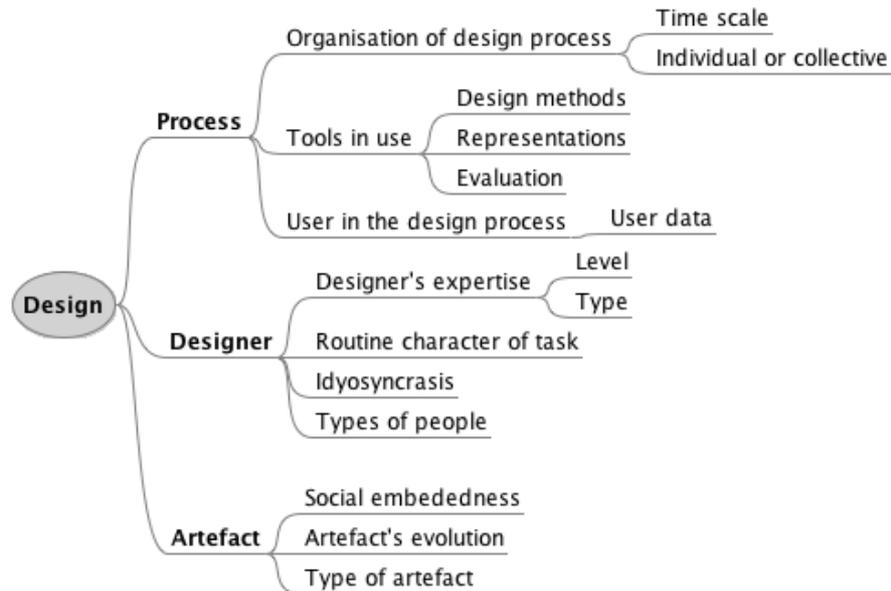


Figure 6: Entités caractéristiques de la conception, d'après **Visser (2009)**

1.2.3 Etudes des pratiques de conception: influence de l'expertise

Dans une analyse bibliométrique de la revue *Design Studies* entre 1996 et 2010, la recherche en conception apparaît centrée sur l'étude du processus de conception et de la cognition (**Chai & Xiao, 2012**). Les mêmes thématiques sont abordées lorsqu'il s'agit de caractériser l'expertise en conception, comme nous le décrivons ci-après.

Choulier relève trois manières d'aborder l'expertise en conception, auxquelles il convient d'ajouter l'observation de **concepteurs novices (Choulier, 2008)**.

- l'étude du **comportement d'experts** en conception. Les experts doivent pouvoir justifier d'au moins dix ans de pratique dans le domaine (**Cross, 2004**) ;
- la comparaison des **comportements de novices et d'experts** ;
- l'observation de **concepteurs exceptionnels**, comme dans **Cross (2004)**.

L'état des lieux qui suit repose sur l'analyse principale de deux ouvrages-clés comptabilisant un total de 40 articles sur divers aspects de la pratique de la conception (**Cross et al., 1996 ; Mc Donnell & Lloyd, 2009**). Chaque ouvrage s'appuie sur un corpus commun de plusieurs sessions de conception enregistrées en format vidéo et retranscrites en format texte². En accord avec **Choulier (2008)**, nous mettons en évidence huit thématiques traitées par les auteurs des ouvrages précédemment cités. Des analyses complémentaires sur des travaux de novices sont intégrées au Tableau 1.

- **Cadrage et Exigences.** Le cadrage du problème et la formulation des objectifs est opérée avec une grande liberté par les experts, s'autorisant l'ajout de variables et de contraintes supplémentaires non initialement définies dans le Cahier des Charges.
- **Modèles de conception.** L'observation de concepteurs d'expertise variable permet de mettre à l'épreuve différents modèles de l'activité de conception, mettant en jeu de diverses façons les espaces du problème et des solutions (par exemple le modèle FBS précédemment cité).
- **Stratégies de résolution.** **Pahl et al. (2007)** distinguent la stratégie « orientée problème » (« problem-oriented ») ou « orientée processus » (« process-oriented »). Dans le premier cas le concepteur développe des solutions complètes qu'il modifie au fur et à mesure, alors que dans le second cas, il cherche plusieurs alternatives à chaque étape, pour ensuite les combiner et vérifier leur compatibilité. En réalité les deux modes de pensée coexistent chez un même concepteur et sont activés de manière opportuniste selon la situation.
- **Pratique réflexive.** L'examen de session de conception est fait dans la continuité des travaux de **Schön (1983)**.

² Les deux sessions de 1996 mettent en jeu un concepteur expert seul, et une équipe de conception ayant 5 à 8 ans d'expertise. Les quatre sessions de 2009 font intervenir : un architecte et ses clients en deux épisodes distants de 8 mois ; une équipe multidisciplinaire de concepteurs sur un projet d'ingénierie, en deux épisodes distants de trois jours.

- **Traitement des informations.** La pratique expérimentée de la conception se traduit par une aptitude à sélectionner les informations utiles au moment opportun. Le rôle de la mémoire dans le "recyclage" d'informations déjà rencontrées est prépondérant chez les experts.
- **Représentation et Objets intermédiaires.** L'utilisation de dessins, schémas et représentations 3D constitue un maillon central du cheminement de la pensée et de la collaboration en conception. Les représentations mises en œuvre sont variées et évolutives.
- **Cognition** et création de **connaissances**, expression de **valeurs** en conception.
- **Collaboration** et **communication** en conception, dont la construction de rôles, le langage et les gestes.

En lien avec ces thématiques, **Lawson (2004)** identifie 5 étapes génériques dans l'acquisition de l'expertise en conception. Ces étapes successives peuvent se superposer, ce qui signifie que la première n'a pas nécessité d'être achevée pour que commence la suivante. L'expertise évolue grâce à la mémoire du concepteur et la construction de stratégies de résolution de plus en plus efficaces : (1) Acquisition d'une vision du domaine ; (2) Construction d'un répertoire d'exemples et de cas ; (3) Identification des principes directeurs pour structurer les acquisitions antérieures ; (4) Aptitude à reconnaître les situations en un temps limité ; (5) Construction d'un répertoire de schémas et d'astuces.

Tableau 1: Caractéristiques de l'expertise en conception

Thèmes	Sujets	Novices	Comparaison Novice /Experts	Experts		
				Auteurs divers	(Cross et al., 1996)*	(Mc Donnell & Lloyd, 2009)**
						1
Cadrage Exigences en conception						
Fonction/Structure Solutions/Modèles			(Ahmed et al., 2003)	(Dorst, 2001)	2	3
Stratégies de résolution	(Liikkanen, 2009)		(Ho, 2001)	(Kruger & Cross, 2006)	1	
Pratique réflexive	(Valkenburg & Dorst, 1998)				1	1
Traitement des informations				(Auriscchio et al., 2010)	3	
Représentations et objets intermédiaires					3	3
Cognition Connaissances Valeurs					3	6
Collaboration Communication					6	7

*Nombre d'articles sur 19 articles au total

** Nombre d'articles sur 21 articles au total

1.2.4 Assistance à la conception par les méthodes et outils

Lorsqu'il s'agit de formation ou de pratique quotidienne de la conception en entreprise, l'utilisation de méthodes et d'outils pour assister l'activité devient un sujet central. **Hicks et al. (2009)** formulent trois problématiques-clés à ce sujet : (1) la sélection et la mise en œuvre d'outils adaptés à un projet donné; (2) une importante mobilisation en ressources temporelles et cognitives pour les utilisateurs des outils; (3) un besoin de formation approfondie aux outils pour en avoir une utilisation efficace. De façon opérationnelle, les concepteurs sont en mesure

d'investir un temps limité dans l'apprentissage d'un nouvel outil, et le feront effectivement à condition d'entrevoir clairement les bénéfices potentiels de la démarche.

1.2.5 Synthèse: facettes de l'activité de conception

Dans cette partie, nous avons fait un bref état des lieux des éléments qui permettent de caractériser la dimension à la fois **technique** et **humaine** de l'activité de conception. Plusieurs modèles de référence associés à différents points de vue sur la conception ont été rappelés. Enfin nous avons relevé plusieurs actions typiques d'une pratique experte en conception (traitement d'informations, analogies, création d'objets intermédiaires, définition de stratégies de résolution...). Cet ensemble de remarques préliminaires nous sert à poser un cadre de référence pour la compréhension de l'activité d'éco-conception.

1.3 Eco-conception

1.3.1 Définition et terminologie

L'éco-conception est une approche **préventive** qui intègre le facteur environnemental à la conception des produits et services (**AFNOR, 2003**). D'après l'ISO, l'éco-conception vise à réduire les impacts environnementaux des produits et services tout au long de leur cycle de vie, tout en préservant ou améliorant les qualités d'usage de ceux-ci. Ainsi définie, l'éco-conception prend en considération deux des trois piliers du Développement Durable, en intégrant des contraintes environnementales et économiques au Processus de Développement de Produit (PDP).

Depuis une quinzaine d'années, il y a eu prolifération de termes voisins pour désigner la prise en compte des facteurs environnementaux en conception. **Bhamra (2004)** rappelle l'apparition successive des termes: éco-conception; Design for the Environment (DfE); life cycle design; ecoredesign; green design; sustainable design. Les années passant, la terminologie semble stabilisée sur les deux premières appellations, à savoir l'éco-conception et le DfE, auxquelles s'ajoute le terme de «sustainable design» proche de la notion de Développement Durable.

1.3.2 Contexte réglementaire

Au plan national, le premier cadre officiel de prise en compte de l'environnement est constitué par la Stratégie Nationale de Développement Durable (SNDD) de 2003. Il a été mis en place la même année un cadre européen équivalent, sous la dénomination de Politique Intégrée de Produits (PIP). Plusieurs directives européennes ont accompagné ce mouvement d'intégration de l'environnement : Emballages, VHU, RoHS, DEEE, EuP (puis ErP), REACH (**AFNOR, 2008**).

- L'acronyme RoHS (2002/95/CE) signifie "Reduction of use of certain Hazardous Substances". Entrée en vigueur en 2006, la directive impose l'élimination de certaines substances dangereuses dans la conception de produits électriques et électroniques. Les substances visées par RoHS sont notamment: le plomb, le cadmium, le mercure, le chrome hexavalent, les retardateurs de flamme bromés (**JOUE, 2003a**).
- La directive DEEE (2002/96/CE) concerne les Déchets des Equipements Electriques et Electronique, pour lesquels sont rendus obligatoires la collecte, le traitement et la valorisation (**JOUE, 2003b**).
- La directive EuP (2005/32/CE) impose les caractéristiques environnementales des produits consommateurs d'énergie (Energy using Products), divisés en 35 catégories. Les véhicules automobiles en sont exclus. Cette directive est élargie aux produits en lien avec l'énergie (Energy related Products) et devient ErP (2009/125/CE) en 2009 (**JOUE, 2009**).
- La directive REACH (1907/2006/CE): Registration Evaluation Authorization of Chemicals. La directive interdit l'emploi de substances dangereuses. Elle impose de plus aux fabricants et importateurs d'identifier les dangers des substances chimiques dans un objectif de traçabilité (**JOUE, 2007**).
- La directive VHU (2000/53/CE) encadre la fin de vie des déchets automobiles des Véhicules Hors d'Usage. Quatre classes d'action sont imposées : prévention (e.g. interdiction de certains métaux lourds); collecte (e.g. reprise gratuite des VHU,

acheminement vers installations autorisées); traitement (e.g. chronologie des actions et exigences de stockage et de traitement); valorisation (objectifs chiffrés) (**JOUE, 2000**).

- La directive Emballage (2004/12/CE) concerne les emballages et déchets d'emballage mis sur le marché européen. Elle impose d'une part des objectifs chiffrés sur le recyclage et la valorisation des emballages, et d'autre des exigences lors de la conception (réduction à la source du poids et/ou volume des emballages; réduction de la teneur des substances dangereuses; réutilisation et/ou valorisation en fin de vie) (**JOUE, 2004**).

1.3.3 Contexte normatif

Le cadre normatif européen est en constante évolution depuis la parution de la norme de référence 14062 en 2003. Il est fondamental de disposer d'un cadre normatif clair pour espérer tendre vers une harmonisation des pratiques. L'on peut ainsi espérer comparer plus simplement des méthodes et des résultats obtenus dans des secteurs industriels variés. Les produits mécaniques sont à ce jour concernés par une norme sectorielle (**AFNOR, 2009a**). Afin de soutenir les entreprises de manière pragmatique la mise en place de démarches d'éco-conception, l'AFNOR finalise actuellement un guide « pas à pas » (PR X30-205) mettant en regard les étapes, les acteurs concernés et les méthodes et outils. L'enjeu est de réduire l'écart entre la pratique des experts en environnement et les préoccupations quotidiennes des autres acteurs industriels.

1.3.4 Motivations et obstacles à l'introduction de l'éco-conception en entreprise

Il existe un consensus sur les motivations et obstacles qui peuvent inciter ou freiner les industriels à mettre en œuvre une démarche d'éco-conception. La synthèse de ces éléments factuels rassemblés au moyen d'enquêtes apparaît sur le Tableau 2 (**Van Hemel, 1998; Boks, 2006; Reyes, 2007; AFNOR, 2008**). La prise en compte de ces motivations conduit à un éventail de leviers pouvant être mis en place dans les entreprises. Les auteurs sont unanimes

sur le poids prépondérant du **facteur réglementaire** d'une part, et sur la pression exercée par le **consommateur final** d'autre part.

Tableau 2: Motivations et obstacles à la mise en œuvre de l'éco-conception en entreprise

Motivations		Obstacles
Internes	Externes	
Opportunité d'innovation Augmentation de la qualité du produit Besoin de communication Implication des dirigeants Maîtrise des coûts Changement d'image	Sentiment de responsabilité environnementale Réglementation Pression des consommateurs Opportunité du marché Pression des Donneurs d'Ordre Incitation des Pouvoirs Publics	Problème de perception environnementale Problème de perception des bénéficiaires Problèmes techniques de satisfaction de qualité Manque d'informations et de retours expériences Manque de connaissances méthodologiques Conflit dans les équipes de conception Absence d'attribution de la responsabilité Résistance au changement Manque de soutien de la direction

1.3.5 Apprentissage en éco-conception

1.3.5.1 Définition des concepts : apprentissage, connaissances et compétences

APPRENTISSAGE

Les concepteurs doivent « apprendre à apprendre ». C'est la notion de «*deutero learning*» défendue par **Argyris & Schön (1996)**. Contrairement à l'apprentissage dit « en simple boucle », l'apprentissage en « double boucle » s'appuie sur une réflexion sur l'action, un questionnement sur les enjeux et sur la définition des tâches.

CONNAISSANCES

A la lumière des travaux de **Nonaka (1997)**, il est classique de distinguer les connaissances *tacites* des connaissances dites *implicites*. Les connaissances tacites sont des savoirs existants non formalisés par le langage ou l'écrit et par essence fort difficiles à transmettre. Les connaissances explicites sont au contraire formalisables sous forme de représentations variées (procédures, modèles...) et ont vocation à être transmises.

COMPETENCES

Le Boterf (2004) cité par **Le Pochat (2005, p. 90)** définit la compétence comme la capacité d'un individu à «*utiliser de manière efficiente ses connaissances, dans un contexte donné, pour parvenir à un objectif donné*». Il précise en outre que les compétences se mobilisent dans l'action et sont liées à un cadre contextuel, en rendant impossible toute définition dans l'absolu. Au sein d'une organisation, les compétences sont à la fois de nature individuelle et collective.

1.3.6 L'environnement et le développement de produits

A ce jour, comment la dimension environnementale est-elle intégrée par les auteurs de référence en ingénierie de conception ? Cet état des lieux s'appuie sur les dernières éditions des ouvrages internationaux les plus référencés dans le domaine (**Pahl et al., 2007 ; Cross, 2008 ; Ullman, 2009 ; Ulrich & Eppinger, 2011**).

Pahl et al. (2007) font apparaître l'approche «Design for Recycling» parmi d'autres méthodes DfX (Design for X) dans le chapitre concernant les lignes directrices de l'Embodiment Design. L'accent se porte donc sur la prise en compte de la seule étape de fin de vie, les autres étapes n'étant pas incluses. Des règles et exemples pour assurer une séparabilité de matériaux et un démontage facile des produits sont fournis. La notion de DfE apparaît d'une façon comparable dans la troisième édition de «The Mechanical Engineering Process» parmi plusieurs autres approches de DfX (**Ullman, 2009**).

Cross (2008) propose une synthèse des méthodes des champs traditionnels de l'ingénierie de conception et du design industriel. La dernière édition inclut les méthodes de scénarisation orientée vers l'usage et les personas. Cependant il n'apparaît pas de chapitre dédié à l'intégration de facteur environnemental.

Ulrich & Eppinger (2011) consacrent une part significative de leur dernier ouvrage à l'éco-conception. Les chaises de bureau éco-conçues du fabricant Herman Miller servent à décrire et illustrer le processus d'éco-conception. La démarche Cradle-to-Cradle sert de fil conducteur à la démonstration (**Mc Donough & Braungart, 2002**). Pour aider les équipes de

conception à prendre des décisions en amont du PDP, il est présenté une série de lignes directrices environnementales déclinées sur les étapes du cycle de vie du produit, adaptées des travaux de **Telenko et al. (2008)**.

1.4 Problématique générale

"Design, the faithful translator of human, financial, natural and social capital into goods since the start of the industrial revolution, is a key catalyst. Design is critical to social acceptance and market longevity" (**Fuad-Luke, 2002, p. 25**).

"Ecodesign is just "good design" " (**Lofthouse, 2001, p. 143**).

"Ecodesign is one strategy being employed to move towards a more sustainable future." (**Bhamra, 2004**).

"... EcoDesign is about Design in and for a sustainable development context" (**Karlsson & Luttrupp, 2006**).

L'éco-conception telle que nous l'envisageons s'inscrit dans un continuum entre la conception (comme point d'ancrage principal) et le sustainable design. En ce sens, la pratique de l'éco-conception ne peut être déconnectée des théories et pratiques de la conception traditionnelle, par rapport à laquelle elle doit impérativement se positionner.

Il a été rappelé dans ce chapitre les visions fondatrices de l'ingénierie de conception, dont on a extrait plusieurs cadres descriptifs éclairant les dimensions de l'activité. En parallèle nous avons rappelé les résultats d'investigations empiriques sur les pratiques de concepteurs novices et expérimentés. L'ensemble de ces travaux contribuent à mieux définir ce que signifie « concevoir » dans une perspective d'amélioration de la formation en ingénierie de la conception.

Notre recherche a pour objectif de poser des questions similaires concernant l'éco-conception, à savoir « **Comment former des ingénieurs-concepteurs à l'éco-conception?** » Jusqu'à présent, la recherche a été grandement focalisée sur la création d'outils adaptés au contexte des projets, et au déploiement d'Analyse de Cycle de Vie dans divers secteurs applicatifs.

D'autres travaux ont posé des bases méthodologiques pour l'apprentissage de l'éco-conception en entreprise, en différenciant le cas de grandes, des moyennes et petites structures. Afin d'apporter une nouvelle contribution concernant cet apprentissage, nous avons la volonté de donner des clés sur les bonnes pratiques de l'éco-conception et sur ce que signifie « éco-concevoir » en regard du sens plus traditionnel donné à « concevoir ». La Figure 7 fait la synthèse du point de vue qui sous-tend ce mémoire.

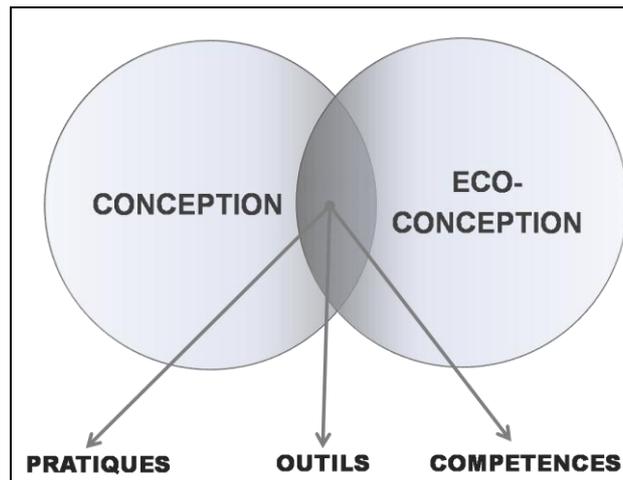


Figure 7: Point de vue mixte entre conception et éco-conception

2. ETAT DE L'ART: LES FACETTES DE L'ACTIVITE D'ECO-CONCEPTION

Dans ce chapitre, nous nous attachons à présenter les nombreuses facettes de l'activité d'éco-conception, qu'elle soit menée en entreprise ou dans un cadre académique. En toile de fond, nous avons présenté la conception et les théories qui servent de référence à ce travail. La problématique de recherche résulte de la conjonction de trois sources de tension rencontrées par les acteurs de la conception dans ces deux contextes industriel et académique. En premier lieu, il y a la complexité des enjeux et critères environnementaux venant s'ajouter aux critères ordinaires de la conception (2.1). En second lieu, la pratique de l'éco-conception fait intervenir de multiples acteurs et organisations qui présentent une maturité environnementale très variable (2.2). Enfin, l'existence de nombreux outils et méthodes d'éco-conception pose un véritable défi dans la sélection, la mise en œuvre et la gestion de ceux-ci aux acteurs de la conception, alors que ces derniers utilisent par ailleurs d'autres outils dédiés à la conception (2.3). La revue bibliographique prend appui sur un ensemble de sources alliant des approches de conception et d'environnement (Figure 8).

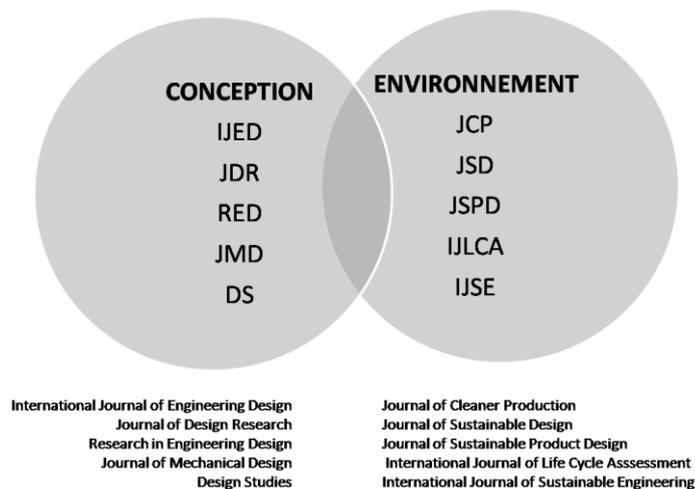


Figure 8: Sources bibliographiques de la recherche

2.1 Complexité des enjeux environnementaux

Avant d’appréhender la manière dont les entreprises intègrent l’environnement en conception de produits, il nous faut éclaircir des notions interdépendantes : cycle de vie, impact et qualité environnementale. De cette analyse émane la complexité de la dimension environnementale, dont on peut dire que c’est une « *dimension floue dans un univers hyper-contraint* » (**Millet et al., 2003**). Nous nous appuyons sur la vision de **Kazazian (2003)**, qui prend le parti d’explicitier la complexité des enjeux environnementaux par la compréhension des relations dynamiques dans la nature. Il retient quatre dimensions caractéristiques liées, qui sont des principes de vie et de régénérescence de la nature (Figure 9):

- L’interdépendance, par laquelle l’existence de chaque système est subordonnée à celle des autres systèmes;
- Le temps, qui traverse tous les systèmes vivants;
- La notion de cycle, qui organise et réorganise en boucle la matière vivante;
- L’optimum, ou la recherche d’un développement satisfaisant avec une énergie minimale.

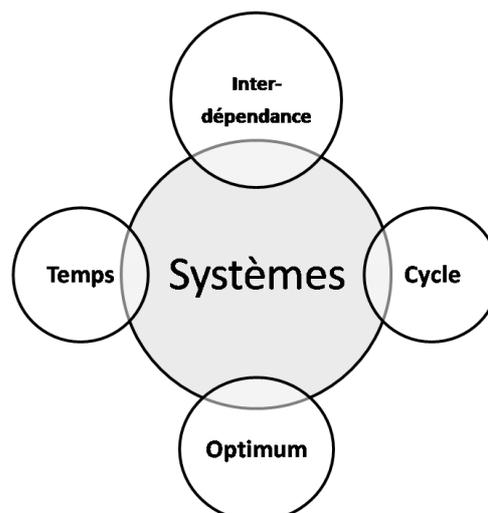


Figure 9: Complexité de la dimension environnementale (**Kazazian, 2003**)

En l'état, cette vision centrée sur le monde naturel ne permet pas d'éclairer la part de complexité due aux interactions de l'homme avec son milieu. Notre point de vue consiste à ajouter la présence humaine par l'intermédiaire de la notion de partie prenante, que nous définirons au paragraphe 2.1.3 (Figure 10).

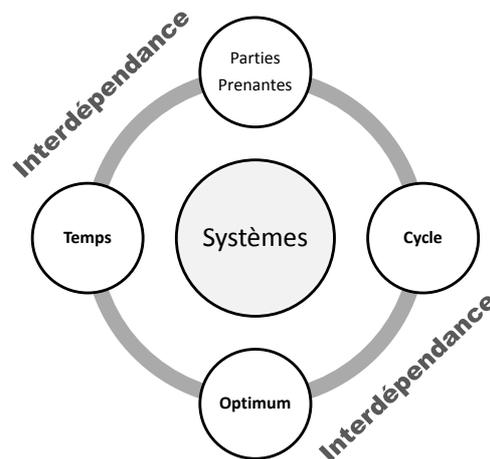


Figure 10 : Complexité de la dimension environnementale adapté de **Kazazian (2003)**

2.1.1 Cycles de vie des produits et services

D'après l'ISO, le cycle de vie d'un produit représente « *les phases consécutives et liées d'un système de produits, de l'acquisition des matières premières ou de la génération des ressources naturelles à l'élimination finale* » (**AFNOR, 2003, p. 3**). En s'appuyant sur cette notion, l'éco-conception est dite « multi-étape ». Une telle « *délimitation du champ des mesures d'impacts* » permet d'éviter des transferts d'impacts entre étapes, susceptibles d'apparaître avec des approches trop locales. Par une action locale on entend intervenir sur une seule étape du cycle, par exemple sur la production ou la fin de vie (**Millet et al. , 2003, p. 42**).

En second lieu, l'éco-conception est une démarche « multi-critère ». A chaque étape du cycle de vie sont générés de multiples impacts, sachant que (1) leurs effets sont couplés que ce soit de façon synergique ou antagoniste; (2) et que les échelles spatio-temporelles des impacts sont diverses.

En conséquence, une vision en cycle de vie implique que le praticien adopte une posture à la fois **transversale** et **transdisciplinaire**. Dans l'entreprise, l'évaluation d'impacts environnementaux potentiels suppose l'acquisition de connaissances sur «*les matériaux, les procédés de fabrication, les procédés énergétiques, les moyens de transport, les procédés de traitement des déchets, les données statistiques (..), les modes de consommation et d'utilisation du produit par les consommateurs*» (**Le Pochat, 2005, p. 74**).

Dans une perspective plus distanciée, Abrassart et Aggeri proposent de considérer le cycle de vie comme un nouveau cadre qui rend visible les relations entre la société et l'environnement. En ce sens, l'objectif du diagnostic environnemental grâce au cycle de vie est de produire des manières distinctes de «*spatialiser, découper, mesurer, cartographier*» ces relations (**Abbrassart & Aggeri, 2002**).

2.1.2 Impacts, critères et indicateurs environnementaux

Un impact environnemental se définit comme «*toute modification de l'environnement, négative ou bénéfique, résultant totalement ou partiellement des activités, produits ou services d'un organisme*» (**AFNOR, 2003, p.3**). Les impacts environnementaux d'un produit sont liés aux flux **entrants** (matières et énergies) et **sortants** générés tout au long du cycle de vie.

S'il est souvent mis en avant avec l'effet de serre, l'épuisement des ressources naturelles n'est qu'un des multiples aspects des impacts environnementaux causés par l'activité humaine. Il faut y ajouter les impacts qui menacent les ressources aquatiques (épuisement, acidification, pollution), la faune et la flore (éco-toxicité), l'espèce humaine (toxicité humaine). Il faut enfin considérer les nuisances, comme le bruit, les odeurs, ou encore la gêne visuelle. Cet ensemble de catégories d'impacts (Figure 11) a pour trait caractéristique de concerner différentes échelles géographiques (ESPACE) ainsi que des échéances d'apparition à plus ou moins long terme (TEMPS) (**Kazazian, 2003**).

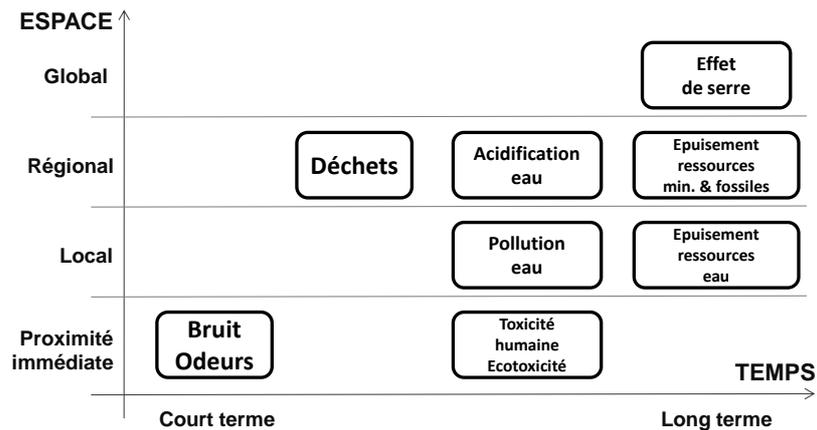


Figure 11: Impacts environnementaux selon les axes «Espace» et «Temps» (**Kazazian, 2003**)

Persson (2001) propose une démarche de création de tels indicateurs pour le développement de produits. Les éco-indicateurs sont des variables qualitatives ou quantitatives qui servent à caractériser la performance environnementale des produits et procédés dans une perspective de Développement Durable. Il s'agit d'une représentation **synthétique** d'un phénomène complexe pour lequel on cherche à évaluer des effets dynamiques de changement. L'utilité des éco-indicateurs au cours du développement de produit est double : (1) éco-labellisation et déclarations environnementales à l'adresse des consommateurs; (2) mise en évidence des problèmes et sélection d'alternatives en conception (**Persson, 2001**).

Millet et al. (2003) présentent trois types d'éco-indicateurs : indicateurs de pollution de l'air, de pollution de l'eau, de consommation de matière MIPS (Material Intensity Per unit of Service) (**Schmidt-Bleek, 1994**). Ce dernier indicateur, autrement connu par l'image du «sac à dos environnemental», caractérise la masse (en kg) de l'ensemble des matériaux à extraire pour obtenir un produit ou service. Bien que simple à mettre en œuvre, cette comptabilité est limitative car elle ignore, par exemple, les effets de toxicité des matériaux ou l'atteinte potentielle à la biodiversité (**Millet et al., 2003, p. 65**).

Le terme « éco-indicateur » qualifie également une méthode d'évaluation et de pondération de différents impacts « midpoint » d'une Analyse de Cycle de Vie (ACV) qui conduisent à l'obtention d'un score unique, dit « endpoint ». La méthode d'obtention de l'Eco-Indicator 95, développé par Pré Consultants-Netherlands apparaît ci-dessous (Figure 12).

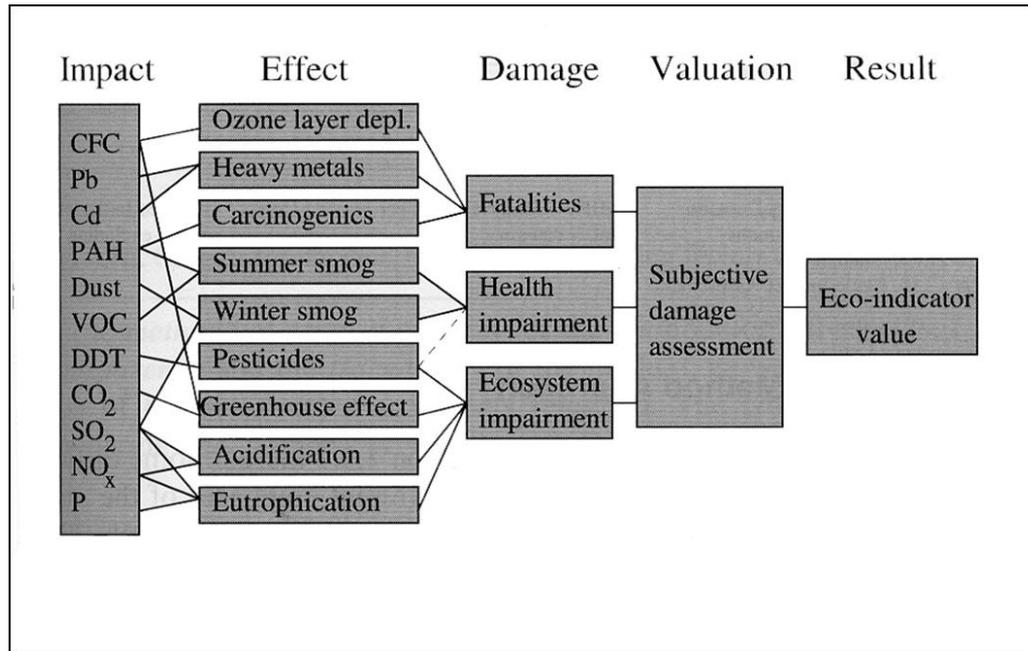


Figure 12: Mode d'obtention de l'éco-indicateur EI 95 (Abele et al., 2005)

Dans la construction de son propre modèle d'intégration de l'éco-conception, **DeWulf (2003)** met en avant le besoin de disposer d'Indicateurs de Performance Environnementale (EPI) facilitant la communication entre les diverses parties prenantes, et participant à la création d'un langage commun. Les critères d'impacts sont intégrés aux EPI. Les trois catégories d'EPI opérationnels retenus par cet auteur sont les suivants.

- « Technically-oriented EPIs »: ce sont des indicateurs familiers des concepteurs car associés aux caractéristiques du produit ou de son cycle de vie. Par exemple une indication de « masse totale [kg] », ou une « consommation d'énergie en mode veille [kWh] ».
- « Ecologically-oriented EPIs »: ce sont des critères d'impact (eg. kg de CO₂/durée de vie [kg]) caractéristiques d'effets « **midpoint** » (eg. Réchauffement Climatique, ou Global Warming Potential [kg CO₂ eq]).
- « Value-oriented EPI »: il s'agit d'un indicateur « **endpoint** », i.e. d'une somme pondérée de plusieurs EPI, comme par exemple l'Eco-indicateur EI95 ou EI99 [Pt].

La description d'un profil environnemental de produit nécessite, la plupart du temps, de sélectionner un ensemble d'EPI caractéristiques de l'application considérée.

Andriankaja (2011) reprend partiellement cette catégorisation en proposant de distinguer les indicateurs «environnementaux d'ingénierie» et les indicateurs d'ACV. Ces derniers ne peuvent être renseignés que par la réalisation d'une ACV, comme par exemple l'eutrophisation ou l'écotoxicité.

2.1.3 Parties prenantes

La qualité environnementale d'un produit est indissociable de la notion de service rendu à l'utilisateur (ou au client final). Le but de l'éco-conception peut alors être vu sous l'angle de l'amélioration de la qualité environnementale, soit de la recherche d'un équilibre optimal entre les « utilités » et « désutilités environnementales » du produit (**Millet et al., 2003**). Par « désutilité », on entend ici les conséquences négatives occasionnées par le produit, mesurées par les impacts environnementaux. A contrario, les « utilités » renvoient aux bénéfices fonctionnels du produit, comme par exemple l'augmentation d'une durée de vie ou l'ajout de fonctionnalités. Mais le client final n'est qu'un des maillons de la chaîne d'acteurs concernés par l'éco-conception de produits.

Les parties prenantes sont ainsi les organisations ou individus concernés par un projet, qui peuvent aider ou freiner la poursuite des objectifs de ce projet (**Fussler & James, 1997**). Des parties prenantes, on peut également dire qu'elles sont en position d'expérimenter les bienfaits et la valeur des produits (**Mc Aloone & Bey, 2009**). En définitive, comme le montre la Figure 13, les parties prenantes sont:

- internes à l'entreprise: équipe de conception, production, marketing, achats, direction..,
- externes à l'entreprise: fournisseurs, sous-traitants, recycleurs, clients finaux, législateurs, organisation non gouvernementales (ONG), organismes de recherche, financeurs.

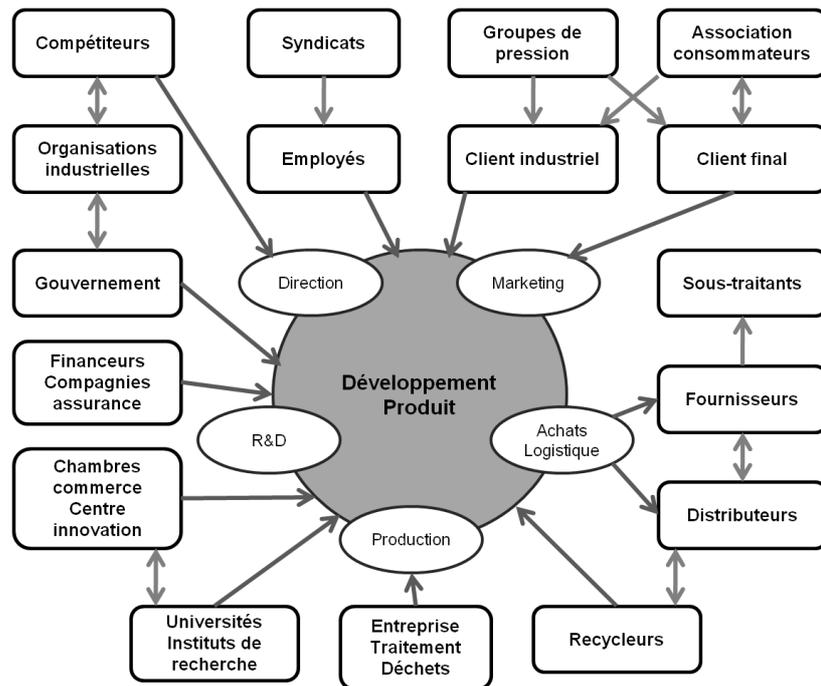


Figure 13: Parties prenantes en éco-conception adapté de **Brezet & van Hemel (1997)**

Ces acteurs sont naturellement associés, de près ou de loin, au cycle de vie des produits. A ce titre, ils se trouvent concernés par la génération d'impacts environnementaux liés aux produits. Les impacts environnementaux trouvent fréquemment naissance à l'interface entre les parties prenantes à l'occasion d'échanges d'informations ou de flux de matière (**Mc Aloon et al., 2010**). Pour appuyer cette remarque, **Boeglin et al., (2006)** insistent sur la nécessité d'engager « *une réflexion sur les comportements et les attentes de la chaîne d'acteurs concernés (industriels, distributeurs, consommateurs, collectivités) afin d'éviter que les efforts des uns ne soient annulés par le comportement des autres* ».

La multiplication des acteurs liés au cycle de vie du produit est une source supplémentaire de complexité dans la mesure où elle implique de coordonner des intérêts variés, voire divergents. Dans le même temps, cette diversité d'acteurs est susceptible de créer de « *nouveaux espaces de compétition et de coopération entre des entreprises* » (**Abbrassart & Aggeri, 2002**). Cet avis est partagé par **Reyes (2007)** qui insiste sur la nécessité de supporter méthodologiquement les relations des concepteurs avec les parties prenantes, afin de diffuser les connaissances environnementales dans et au-delà de l'entreprise. Il est favorable

d'informer les parties prenantes dans un premier temps, puis de les faire progressivement participer au processus de prise de décision (**Reyes, 2007**).

2.1.4 Synthèse : complexité des enjeux environnementaux

La complexité de la dimension environnementale et de la vision de cycle de vie des produits et services fait émerger des questions inédites dans l'entreprise (**Abbrassart & Aggeri, 2002**). Pour les concepteurs, avoir une vision claire des enjeux liés à la réduction d'impacts environnementaux est une tâche délicate pour plusieurs raisons. La première origine de la complexité tient au fait que chaque facteur d'impact contribue simultanément à plusieurs catégories d'effets, qui influent eux-mêmes sur plusieurs types de dommages. Il est communément mis en avant la variété des facteurs d'impacts à différentes échelles géographiques et temporelles, et la difficulté de compréhension d'effets propres aux sciences de l'environnement comme l'eutrophisation ou l'acidification de l'air. Dans une moindre mesure, l'établissement de frontières pour établir le (ou les) cycle(s) de vie des produits et services est un passage délicat. Nous avons souligné que les impacts environnementaux étant liés à des flux de matière et d'information, ils sont par là même liés aux diverses parties prenantes impliquées dans la chaîne de valeur d'un produit ou service. Cela sous-tend donc une question supplémentaire pour la pratique et l'apprentissage de l'éco-conception : qui sont les parties prenantes et parmi celles-ci, lesquelles seront impliquées dans le processus d'éco-conception ?

Nous souhaitons ainsi rendre explicite les enjeux environnementaux pour des concepteurs, alors que ces enjeux sont multiples et interconnectés.

2.2 Intégration de l'environnement par les acteurs du processus de développement de produits

2.2.1 Nature évolutive des démarches d'intégration de l'environnement

La prise en compte de la dimension environnementale en conception s'accompagne nécessairement d'une projection à court, moyen, long et très long terme des activités de l'entreprise. En effet, une forte remise en cause d'un produit ou d'une organisation requiert un effort réparti sur une large échelle de temps. Les niveaux de remise en cause définis ci-après traduisent la **maturité de la démarche** d'éco-conception dans l'entreprise (**Bellini & Janin, 2011**).

Les points de vue sur la dimension environnementale peuvent être centrés sur (Figure 14):

- le produit, en illustrant le degré d'éco-efficacité que l'on peut attendre suivant le niveau de remise en cause visé (**Brezet, 1997**);
- l'entreprise, en montrant le bénéfice qu'elle peut retirer de l'utilisation de différentes méthodes (**Charter & Chick, 1997**), ou le degré de changement organisationnel impliqué par l'adoption des diverses démarches (**Millet, 2001**), (**Millet et al., 2003**) ;
- l'ensemble des organisations, du service interne de l'entreprise à la société entière en précisant le potentiel de réduction des impacts environnementaux au niveau de chaque structure en fonction du temps (**Bras, 1997**).

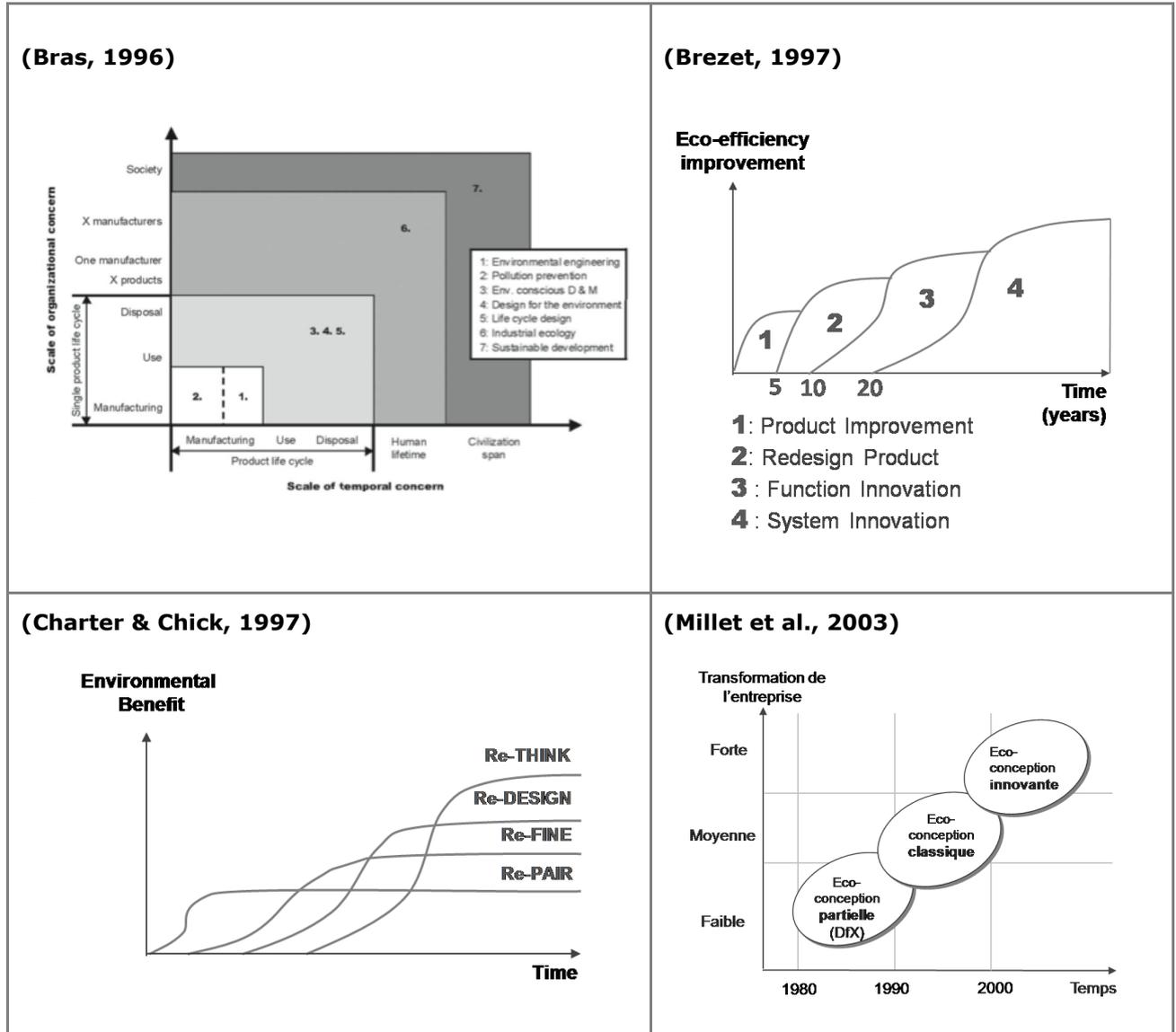


Figure 14: Perspectives temporelles de la dimension environnementale

La revendication d'un caractère systémique de l'éco-conception apparaît à d'autres reprises. Le cadre que développe **De Wulf (2003)** articule trois niveaux d'activités d'éco-conception grâce à la définition d'indicateurs environnementaux de performance EPI (cf. 2.1.2) : (1) Projet ; (2) Entreprise ; (3) Secteur d'activité. Pour **Bauman et al. (2002)**, le processus d'éco-conception s'organise suivant quatre niveaux contextuels (1) contexte du projet de développement de produit; (2) contexte de l'entreprise et de sa direction stratégique; (3) contexte de la chaîne de valeur du produit incluant les fournisseurs, les consommateurs ou les recycleurs ; (4) contexte de l'élaboration de la politique environnementale.

Cette juxtaposition de représentations temporelles et spatiales met l'accent sur la nature évolutive et progressive des démarches d'intégration de l'environnement. Il en ressort que toute recherche de radicalité en matière de réduction d'impacts environnementaux impose de profondes remises en cause des produits, mais aussi des organisations et de la société toute entière.

Afin de disposer d'un indicateur temporel traduisant la performance environnementale des produits, la notion de Facteur X a été définie (**Factor 10 Club, 1995; Von Weizsacker et al., 1997**). L'atteinte du Facteur X (4, 10 ou 20) est subordonnée à la réduction de la consommation de ressources mondiale dans un rapport de X à un horizon de temps donné. Ce facteur prend en compte le phénomène d'augmentation de la population mondiale.

En se restreignant à l'échelle de l'entreprise, l'intégration de l'environnement s'accompagne de la mise en place d'un processus d'éco-conception compatible avec le PDP classique, comme nous le voyons ci-après.

2.2.2 Processus d'éco-conception

2.2.2.1 Intégration de l'éco-conception au processus de développement de produits

La question de l'intégration de l'environnement au PDP est traitée par la proposition d'un modèle générique (**AFNOR, 2003**). Il se compose d'étapes classiques (Planification, Conception Préliminaire, Conception détaillée, Essais et prototypes, Production et lancement sur le marché, Revue de produit) et d'actions recommandées à chaque étape. En théorie, la genericité du modèle doit permettre à n'importe quelle entreprise d'implanter la démarche au cœur de sa propre organisation. Quelque soit le produit ou le secteur considéré, les points-clés de l'intégration ont trait (1) à la nature itérative du processus ; (2) au nombre et la qualité des informations et données à recueillir sur le produit; (3) au choix d'indicateurs et à la mise en œuvre de l'évaluation environnementale des versions successives du produit ; (4) à la gestion de la chaîne d'approvisionnement dans un contexte globalisé (**AFNOR, 2003**).

Sur ce modèle de base, **Le Pochat et al. (2007)** font coïncider les principaux types d'outils d'éco-conception à chaque étape (Figure 15). Il ressort deux classes d'outils, les plus fournies

car essentielles à l'activité d'éco-conception : les outils d'**évaluation**, et les outils d'**amélioration** environnementale relatifs à la recherche de solutions éco-conçues.

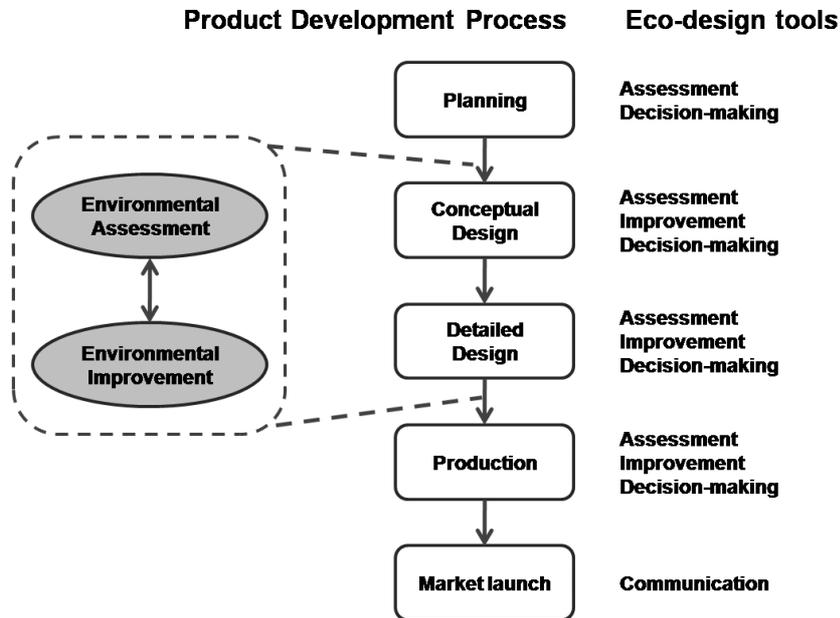


Figure 15: Etapes du PDP et outils d'éco-conception (**Le Pochat et al., 2007**)

2.2.2.2 Processus d'éco-conception itératif: apprentissage organisationnel

La complexité d'intégration de l'environnement, vu ici comme une « *notion floue* » en conception de produits est illustrée par **Millet et al. (2001)** lorsqu'ils affirment que « *pour intégrer une notion floue dans l'univers déjà hyper-contraint de la conception, il faut progresser par palier* ». L'univers en question est dit « *hyper-contraint* » au regard des contraintes classiques de coût, de qualité, de délais, de sécurité.

L'intégration pérenne de l'environnement en conception repose sur un « *changement de paradigme* », c'est-à-dire de principes, d'organisation et de méthodes de travail, et enfin de produits (**Millet et al., 2003**). En d'autres termes, faire évoluer la conception des produits, c'est avant tout accompagner la démarche de transformation de l'entreprise dans sa dimension dynamique et évolutive. La transformation s'appuie sur trois entités actives: la direction de l'entreprise, l'équipe de conception et la cellule environnement. Il faut noter que l'un des fondements de l'action repose sur l'appropriation des outils d'éco-conception par les acteurs. Quatre étapes principales viennent à cet effet jaloner la démarche: (1) création d'outils; (2)

mise à l'épreuve des outils par l'équipe de conception et la cellule environnement ; (3) capitalisation des outils ; (4) diffusion des outils dans les services.

Dans la continuité des travaux précédents, **Jacqueson (2002)** avance que l'intégration de l'environnement en entreprise implique de prendre en compte trois domaines essentiels : les méthodes et outils, la création de connaissances et le management des organisations. Il propose de mettre au point un processus de création de connaissances environnementales qui repose sur trois actions fondamentales: la formalisation, la diffusion et enfin la valorisation des connaissances (Figure 16). La notion de palier est reprise pour le pilotage de ces actions, pour lesquelles sont définis des niveaux de progression. Dans l'organisation, la dimension environnementale est perçue au premier niveau comme une **contrainte**, puis comme un **critère** pour la conception, et enfin comme une **source de bénéfice** ou une véritable **valeur ajoutée** portée par l'entreprise (dimension Valorisation).

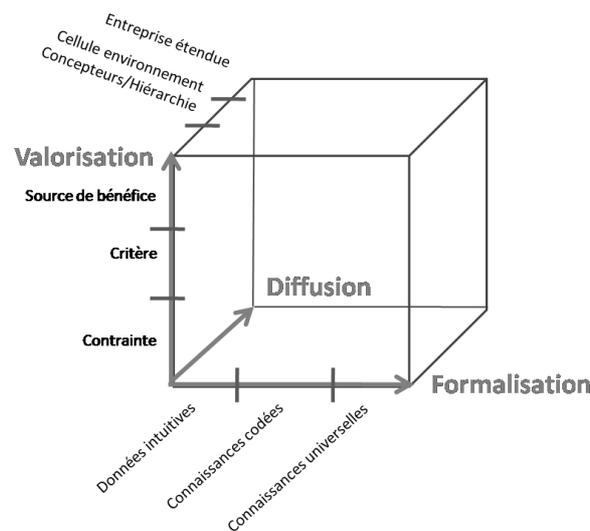


Figure 16: Référentiel d'évaluation du processus de création de connaissances en environnement
(Jacqueson, 2002)

Reyes (2007) s'attache à proposer un cadre d'intégration pérenne de l'environnement en entreprise, et plus particulièrement dans les PME. Tout comme précédemment, l'enjeu est d'accompagner une progression par étape à l'aide d'un outil de pilotage. Le point commun entre les postures est d'envisager un nombre croissant d'acteurs impliqués dans la démarche (cf. segmentations de la dimension Diffusion de Jacqueson et de l'axe Relationnel). En

revanche les outils prennent ici une place centrale (sur l'axe dit méthodologique) car c'est grâce à la co-création d'un outil interne et dédié à l'entreprise que la connaissance environnementale va pouvoir s'étendre et se densifier.

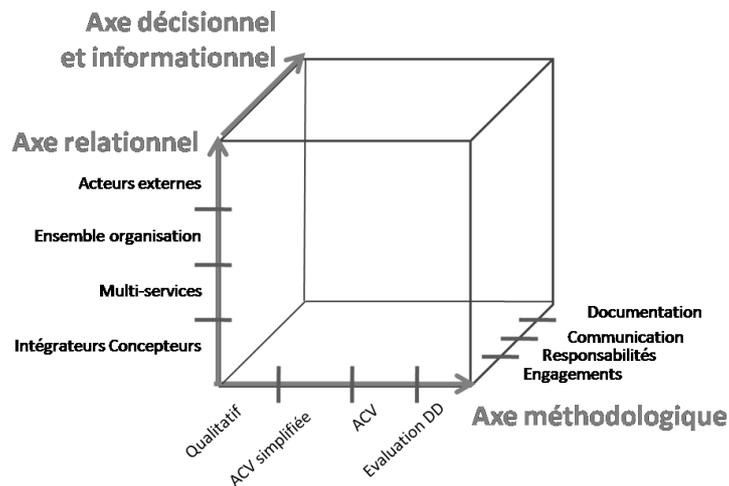


Figure 17: Mécanisme d'intégration globale de l'environnement en conception, d'après **Reyes (2007)**

2.2.3 Acteurs du processus de développement de produits

2.2.3.1 Concepteurs et équipes de conception

Parmi les acteurs ayant un rôle pivot dans le processus d'intégration de l'environnement, les concepteurs et les équipes de conception sont souvent mis en avant (**Ritzen, 2001; Akermark, 2005; Lindhal, 2005**).

Après avoir posé une échelle de niveaux de maîtrise allant de l'ignorance totale à la maîtrise de la dimension environnementale, **Le Pochat (2005)** souligne la nette différence d'expertise requise pour mener les activités d'évaluation ou d'amélioration environnementale. Alors que la démarche de recherche d'améliorations peut être envisagée à un niveau intermédiaire de compréhension des enjeux environnementaux, l'évaluation environnementale reste réservée à des acteurs compétents ou experts en environnement, de par les difficultés d'interprétation rencontrées lors de cette phase (Figure 18). Si un référentiel encadré par l'expert en environnement a pu être défini au préalable, il devient envisageable pour les concepteurs d'entreprendre une utilisation autonome des outils d'évaluation (**Le Pochat, 2005**). La

position de l'ADEME renforce ce dernier point. Il semble possible de charger les concepteurs de l'évaluation environnementale en l'absence d'un encadrement d'expert à condition que les objectifs d'éco-conception soient exprimés à l'aide d'indicateurs dits « *bien choisis* » (par exemple masse du produit, consommation d'énergie, nombre de composants) (ADEME, 2010).

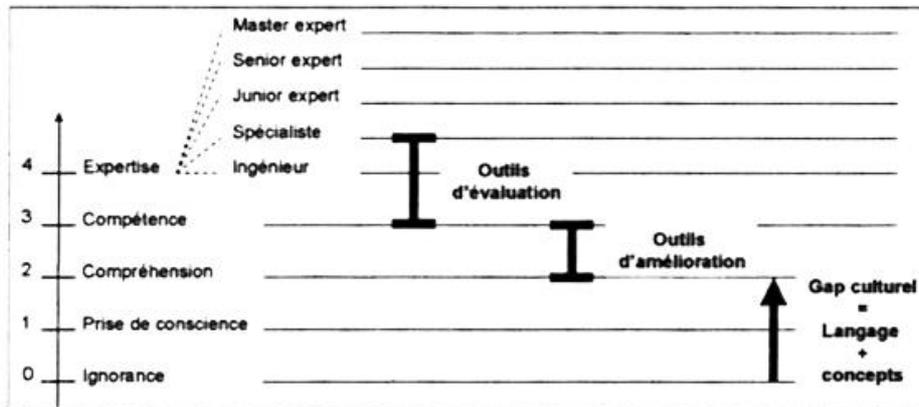


Figure 18: Outils d'éco-conception utilisables en fonction du niveau d'expertise (Le Pochat, 2005)

Les concepteurs ont besoin de savoir « pourquoi » (« *know why* »), tandis que les experts en environnement doivent savoir « comment » (« *know how* ») (Ritzen, 2002, p.42). La connaissance la plus élémentaire pour mener à bien une amélioration de la conception des produits et services consiste à savoir POURQUOI les produits doivent être adaptés au plan environnemental. Une connaissance environnementale avancée permet aux experts de savoir COMMENT évaluer les performances environnementales des produits.

2.2.3.2 Entreprise étendue

En mettant des produits sur le marché mondial, les entreprises et leur réseau de fournisseurs et partenaires, dites « entreprises étendues », ont à la fois une immense responsabilité et un rôle dans le déploiement de l'éco-conception. Cela implique un changement d'état d'esprit vis-à-vis de la notion d'environnement qui doit être acté au plus haut niveau hiérarchique, transformant la dimension environnementale d'une contrainte à une réelle valeur ajoutée pour l'entreprise. Ce changement d'orientation n'est possible qu'à la condition de modifications

organisationnelles au cœur des services internes de l'entreprise et de l'entreprise étendue (**Baumann et al., 2002; Boks, 2006; Millet, 2007**).

2.2.4 Synthèse: maturité environnementale des acteurs du PDP

Par rapport à un contexte classique de conception, l'intégration de la dimension environnementale suppose un positionnement stratégique des entreprises à court, moyen et long (voire très long) terme. De plus cette intégration implique de construire un processus d'éco-conception compatible avec le PDP de chaque organisation. Enfin, les acteurs concernés par l'éco-conception des produits sont démultipliés et distants géographiquement du fait de la globalisation des marchés. Le processus d'apprentissage de l'éco-conception à l'adresse des concepteurs se doit de prendre en compte ces dimensions contextuelles particulières: nature évolutive, temporelle et distribuée de l'activité.

2.3 Méthodes et outils d'éco-conception : abondance et difficulté de caractérisation

2.3.1 Définition : méthodes et outils d'éco-conception

Le terme d'outil d'éco-conception désigne un quelconque moyen de prendre en compte de façon *systematique* les considérations environnementales au cours du processus de développement de produit (**Baumann et al., 2002**). L'on peut supposer cette vision fortement marquée par les approches prescriptives en conception telle que celle de **Pahl et al. (2007)**. Pour **Ritzen (2000, p.10)**, les outils d'éco-conception assistent les concepteurs dans leurs tâches quotidiennes: « *artifacts that support product developers with certain considerations or tasks, typically arranged in software or written guidelines* ». Au travers d'interviews menées avec des concepteurs, **Lindhal (2005, p. 39)** remarque que ces derniers accordent finalement bien peu d'importance à la distinction entre méthode et outil. Ils sont par contre sensibles au bénéfice qu'ils peuvent tirer des outils. La question de la différenciation sémantique entre méthode et outil semblerait donc être une préoccupation d'ordre plus académique que pratique (**Lindhal, 2005**).

2.3.2 Catégorisations des méthodes et outils d'éco-conception

Il existe de multiples manières de présenter et de regrouper les méthodes et outils d'éco-conception, qui sont autant de reflets des préoccupations réelles des praticiens du monde industriel. Pour donner une vision synthétique de cet ensemble hétérogène de descriptions (Tableau 3) nous proposons d'associer à chaque classification:

- L'intitulé des grandes **familles** d'outils envisagés au niveau hiérarchique le plus élevé;
- **Les attributs** ou critères retenus pour décrire les familles d'outils. Les attributs les plus fréquemment utilisés sont examinés en détail dans ce qui suit : nature des entrées et sorties, objectifs, perspective de cycle de vie.

		Attributs des outils																						
Auteur	Familles d'outils	Prise en compte des exigences produit *	Etapes Cycle de vie	Nature des entrées/sorties (qualitatives/quantitatives)	Etapes Processus Développement Produit	Utilisateurs-cibles du PDP	Utilisateurs-cibles : secteur/pays	Intégration et Position au cours du PDP (amont/aval)	Méthode d'évaluation environnementale	Temps de mise en œuvre	Coût	Facilité de prise en main	Compatibilité avec outils CAO	Compatibilité avec peu de données d'entrée	Multidisciplinarité	Objectif de l'outil	Présence de cas d'application	Type de présentation (matrice/checklist/guideline)	Nature de l'outil (Logiciel/Guide/Base de données...)	Favorisation de nouvelles solutions	Evaluation des impacts (Oui/Non)	Maturité Développement outil (Théorique/Expérimental/Consolidé)	Généricité (Générique/Sectoriel)	Dédié/Support
(Bovea & Peres-Belis, 2011)	1-Evaluation of env. requirements-2-Integration in the PDP																							
(Neves Puglieri & Ometto 2011)	Eco-conception basé sur QFD et AMDEC																							
(Pigosso & Rozenfeld, 2011)	Eco-conception																							
(Knight & Jenkins, 2009)	Eco-conception																							
(AFNOR, 2008)	1-Outils normatifs-2-Non normatifs																							
(Fargnoli & Kimura, 2006)																								
(Lindhal, 2005; 2006)																								
(Millet, 2003)	Eco-conception																							
(Lagerstedt, 2003)	Environmental assessment																							
(Tischner, 2001)	Eco-conception & Sustainable Design																							
(Janin, 2000)	Eco-conception																							

*Autre qu'environnementale

Tableau 3: Attributs de description des méthodes et outils d'éco-conception

2.3.2.1 Nature des entrées et sortie des outils

Du point de vue de l'utilisateur, il est essentiel de savoir comment qualifier les résultats issus d'un outil d'évaluation environnementale. Ces résultats peuvent être qualitatifs, quantitatifs ou encore semi-quantitatifs. Les méthodes qui conduisent à des résultats qualitatifs ou semi-quantitatifs sont simples à utiliser et s'appliquent aux étapes amont du PDP (**Bovea & Perez-Belis, 2011**). Cependant, la fiabilité des résultats est sujette à caution. Nécessitant de nombreuses données, les résultats quantitatifs d'évaluation sont nécessaires pour établir un profil environnemental précis, et interviennent de fait plus tardivement dans le PDP (**Bovea & Perez-Belis, 2011**). **Baumann et al. (2002)** proposent également de classer les outils suivant leur caractère qualitatif (frameworks, checklists) ou quantitatif, distinguant dans cette catégorie des degrés variables de simplification (e.g. rating/ranking tool) ou d'exhaustivité. Ils élargissent le champ traditionnel aux systèmes experts de gestion de données environnementales, et aux outils dédiés à l'organisation des activités de DfE au cœur des entreprises.

2.3.2.2 Objectifs des outils

Afin de décrire des objectifs d'éco-conception à atteindre, **Janin (2000)** identifie les outils d'évaluation et d'amélioration environnementale. Il y ajoute les outils de sensibilisation et les outils stratégiques plus adaptés aux phases amont de planification du processus d'éco-conception ; les outils de communication des qualités environnementales d'un produit en phase aval de développement. **Le Pochat (2005)** propose plus simplement de distinguer: les outils d'évaluation environnementale (analyse de cycle de vie ou ACV, matrices et listes de contrôle) ; les outils d'amélioration environnementale (lignes directrices, créativité « E »), et enfin les outils permettant les deux approches simultanées (ACV et éco-indicateurs).

2.3.2.3 Perspective de cycle de vie

Il est pertinent pour certains auteurs de caractériser les outils d'éco-conception selon leur étendue d'intervention sur le cycle de vie (Tableau 4).

Auteur	Classification
(Baumann et al., 2002)	Frameworks (DfX) Checklist and guidelines Rating and ranking tools Software expert systems Organizing tools (LCA)
(De Wulf, 2003)	Life cycle assessment Indicator approaches Qualitative and checklist approaches Guidelines Single aspect Optimization tools Environmental Quality Function Deployment
(Le Pochat, 2005)	Evaluation environnementale Amélioration environnementale Evaluation et Amélioration environnementale
(Knight & Jenkins, 2009)	Checklists Guidelines Analytical tools

Tableau 4: Exemples de classifications des outils d'éco-conception

De Wulf (2003) fait une description de six catégories d'outils d'éco-conception en fonction d'un besoin décroissant d'informations d'entrée. On peut remarquer la nature différente des deux dernières catégories. Les outils d'optimisation comme le Design for Recycling ou Design for Disassembly ne concernent en effet qu'une étape du cycle de vie. Les versions environnementales du QFD ne font pas apparaître les étapes du cycle de vie, mais permettent de mettre en relation des regroupements de catégories d'impacts avec des caractéristiques techniques du produit.

Pour **Knight & Jenkins (2009)**, c'est l'étendue de l'approche sur le cycle de vie ou au contraire sur une ou plusieurs étapes de ce cycle qui sert à distinguer différentes catégories d'outils, réduites à trois. Les listes de contrôle (ou checklists) aident à faire des propositions détaillées avec un spectre de cycle de vie assez étroit: « *in-depth but narrow application* ». Les lignes directrices (ou « guidelines ») sont a contrario peu détaillées (« *broad with little detail* »), mais prennent en compte toutes les étapes du cycle de vie du produit. Les outils analytiques combinent les deux aspects, étant à la fois détaillés et à large spectre en cycle de

vie (« *Detailed and/or system analysis* ») : Eco Indicateur, Environmental Effect Analysis (EEA), ACV, Matériaux Energie Toxicité (MET), Life Cycle Costing (LCC).

2.3.3 Exemples d'outils d'éco-conception

Dans cette partie nous présentons un échantillon d'outils d'éco-conception, des plus élémentaires en terme de présentation (comme les outils-radar ou matriciels) aux plus complets (comme les guides d'éco-conception). Par souci de concision, nous ne présenterons pas ici les outils dérivés d'outils d'ingénierie comme le QFD, l'Analyse de la Valeur ou l'AMDEC (**Bovea & Peres-Beliz, 2011**). En revanche, ces derniers outils sont intégrés à l'analyse que nous menons dans le paragraphe 3.4.1.

2.3.3.1 Outils-radar

En éco-conception, il existe plusieurs variantes d'outils-radar, dont l'objectif principal est de fournir une **base comparative visuelle** des performances environnementales entre deux alternatives de produits. La roue d'éco-conception (« LiDS Wheel ») (**Brezet & Van Hemel, 1997**) et l'EcodesignWheel (**Bhamra & Lofthouse, 2007; Lofthouse, 2009**) (Figure 19) répondent à la même logique de présentation. Les axes de la « LiDS Wheel » correspondent à sept étapes du cycle de vie produit ou système, complété d'une étape stratégique (New Concept Development). Chaque axe, gradué de 1 à 5, est relié à un ensemble de stratégies d'améliorations élémentaires. Le mode d'utilisation de l'outil est double. Il préconise de nouvelles voies génériques de recherche de stratégies et permet d'évaluer de façon relative un nouveau produit par rapport à un produit de référence à l'aide de critères d'impacts préalablement définis.

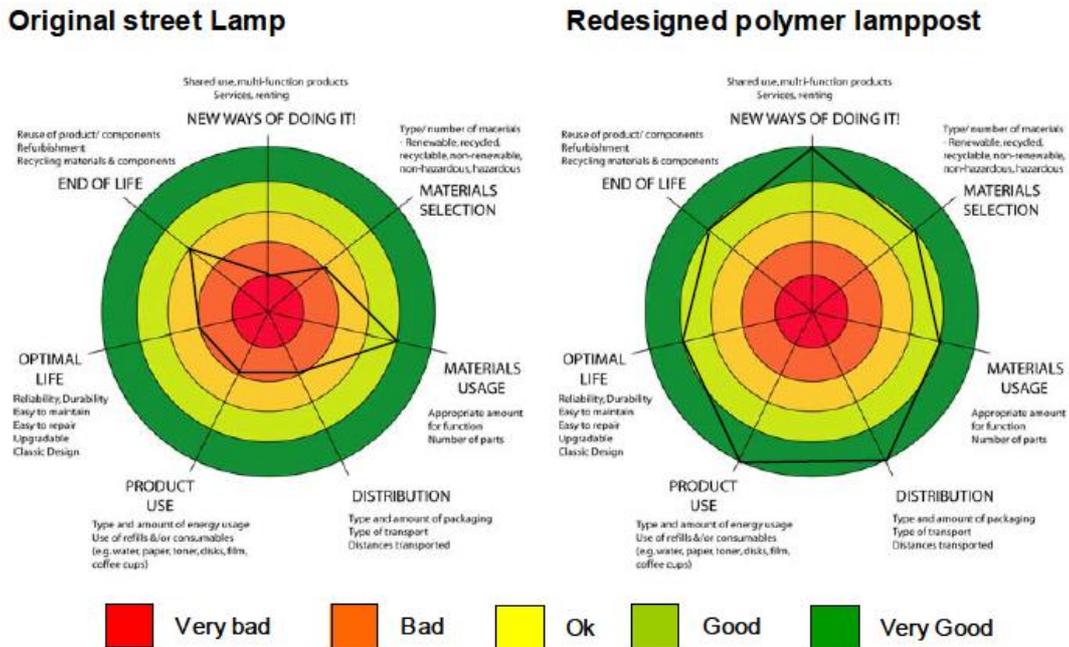


Figure 19: Evaluation d'un réverbère par l'EcoDesign Wheel (Lofthouse, 2009)

L'Eco Compass (Fussler & James, 1996) met l'accent sur six axes de défi économique et environnemental. L'évaluation relative de deux versions de produit requiert une base de comptabilité ACV. L'échelle d'évaluation, non linéaire, s'appuie sur le concept du Facteur X. Le niveau 2 indique une absence de modification de performance par rapport à la référence, alors que les niveaux 4 et 5 correspondent à une amélioration d'un facteur 2 ou 4.

2.3.3.2 Outils matriciels

Les outils matriciels comptent plusieurs variantes dont: la matrice MET (Matériau Energie Toxicité) (Brezet & Van Hemel, 1997), la matrice MECO (Materials Energy Chemicals Other) (Hoschorner & Finnveden, 2003), l'ESQCV (Evaluation Simplifiée Qualitative en Cycle de Vie) (AFNOR, 1998). Leur intérêt est de visualiser et d'organiser les informations concernant tous les types d'impacts environnementaux regroupés en 3 ou 4 grandes catégories, et de les déployer sur les cinq étapes du cycle de vie (Extraction de Matériaux, Production, Distribution, Utilisation, Fin de Vie).

Ces matrices peuvent être renseignées quantitativement, à condition d'avoir préalablement défini les frontières du produit avec ses consommables, et le service rendu grâce à la notion

d'Unité Fonctionnelle. Il est possible d'indiquer qualitativement une importance relative entre les zones d'impacts, à l'aide de points de diamètres différents par exemple.

2.3.3.3 Outils guides méthodologiques

Les guides ou manuels d'éco-conception sont des outils structurés qui présentent le plus souvent une démarche en plusieurs étapes. Ils peuvent comporter plusieurs outils élémentaires (par exemples outils-radars ou outils matriciels). Le guide d'éco-conception est utilisable de façon privilégiée: (1) pour aider au partage des notions-clés de l'éco-conception et structurer les échanges dans les équipes multi-disciplinaires autour d'un expert en environnement (**ECOFAIRE, 2008**); (2) au cours de la formation d'étudiants à l'éco-conception (**Lofthouse, 2009**).

Dans une étude analysant 18 guides d'éco-conception, **Diehl & Brezet (2005)** relèvent que plus des 2/3 des outils exposés en détail dans ces guides traitent de l'évaluation environnementale. Etonnamment, très peu d'outils d'aide à la créativité ou de gestion des coûts s'y trouvent représentés, avec moins de 5% pour ces catégories. Nous présentons succinctement les caractéristiques de sept guides d'éco-conception (Tableau 5), dont trois seront mis en situation expérimentale dans la partie 4. La description détaillée de plusieurs de ces guides se trouve en ANNEXE 1.

Tableau 5: Exemples de guides d'éco-conception

Nom outil /auteur/Date de publication	Langue	Destiné à	Objectifs
D4S /Crul&Diehl /2009	Anglais	Concepteurs de produit Professionnels de la conception	“In-the-box”: approche pas-à-pas “Out-of-the-box”: innovation for sustainability
Guide DTU /McAloone & Bey /2009	Anglais	Concepteurs Equipes de conception	Amélioration environnementale en 7 étapes Exemples : cas industriels Auto-diagnostic environnemental
ECOFAIRE /SEM Pays de Loire /2008	Français	Concepteurs, Designers industriels, R&D, Marketing ... Enseignants Etudiants	Introduction à l'éco-conception Diagnostic/ Première évaluation environnementale Recherche solutions/Evaluation solutions Communication
Okala /White et al. /2007	Anglais	Concepteurs Etudiants en conception	Stratégies d'éco-conception Evaluation environnementale Pratique de l'éco-conception en entreprise
Information Inspiration /Loughborough University /2005	Anglais	Designers industriels	Introduction à l'éco-conception Stratégies environnementales Exemples d'éco-produits
ECODESIGN PILOT /TU Wien /2001	10 langues	Concepteurs Designers industriels Producteurs Responsables environnement	Introduction à l'éco-conception Stratégies environnementales Pistes d'amélioration environnementale
« PROMISE » /Brezet&Van Hemel /1997	Anglais	Concepteurs de produit Professionnels de la conception	Approche pas-à-pas en 7 étapes Modules méthodologiques ciblés

Sur la Figure 20, nous mettons en regard les étapes abordées par cinq de ces guides d'éco-conception. Derrière des intitulés variés, il ressort des étapes communes qui constituent le cœur de l'activité d'éco-conception. La caractérisation du cycle de vie et des facteurs d'impacts associés sont visibles au premier plan. La définition de stratégie d'éco-conception (ou d'éco-stratégie) se retrouve à plusieurs reprises. Cette notion recouvre un ensemble de différentes directions ou voies qui peuvent être suivies en éco-conception dans un contexte produit, projet et entreprise donné (**Brezet & Van Hemel, 1997, p. 69**). Ces voies dépendent de la typologie environnementale des produits considérés (voir 2.3.4).

Le troisième point commun que nous souhaitons souligner réside dans l'enchaînement de la recherche de solutions (« options », « ideas » ou « concepts ») et de leur évaluation environnementale (« assessment » ou « quantification »). Les outils dédiés à cette dernière activité font l'objet du sous-paragraphe suivant.

Guides	PROMISE	ECOFAIRE	Okala	D4S Redesign	DTU		
Référence	Brezet & Van Hemel, 1997	ECOFAIRE, 2008	White et al., 2007	Crul & Diehl, 2009	Mc Aloone & Bey, 2009		
Etapas	Organize Project	Cadrage et enjeux	Life Cycle Strategies	Product Lifecycle	Select Product	Use context	
	Select Product	Evaluation env. Initiale		Eco-design strategies	Product Dossier	Overview (life cycle/impacts)	
	Eco-design Strategy	Recherche de solutions		Process Tree	Review Important impacts	Eco-Profile	
	Generate and select ideas	Evaluation des solutions		Strategies in depth	Simple D4S Assessment	Stakeholder Network	
	Detail concept	Bilan et Communication		Balancing choices	Product's impact Profile	Quantification	
	Communicate/launch product		Assessment	Life Cycle Assessment	Improvement Targets	Conceptualisation	
	Follow-up activities			Impact factors	Redesign Options	Eco-Strategy	
				Practice	Comparing impacts	Prioritize ideas	
					Green Marketing	Organize pilot project	
					Eco-design business planning		
			Practicing eco-design				

Figure 20: Etapes abordées par les guides d'éco-conception

2.3.3.4 Outils d'Analyse de Cycle de Vie

L'Analyse de Cycle de Vie, méthode de référence en matière d'évaluation environnementale, permet d'obtenir une image exhaustive des impacts *potentiels* d'un produit ou système au travers de multiples indicateurs déclinés sur l'ensemble du cycle de vie (**AFNOR, 1997**). Une telle analyse est indispensable pour avoir des données de comparaison approfondies et rigoureuses entre plusieurs produits ou systèmes. Cependant, cette méthode se révèle inadaptée lors des phases amont de la conception, puisque trop peu de données sur le produit sont alors disponibles (**Millet et al., 2007**). Ceci est également vrai lors de la conception d'un produit innovant (**Millet et al., 2003**). De façon générale, la démarche d'ACV complète est longue à mettre en œuvre, coûteuse, complexe et nécessite donc l'intervention d'un expert en environnement (**Le Pochat, 2005; Reyes, 2007**).

Pour apporter une réponse à ce problème pratique de mise en œuvre en amont du PDP, Vogtlander suggère d'utiliser une méthode d'ACV simplifiée, dite « *Fast Track LCA* » (**Vogtlander, 2010**). Mais les outils d'évaluation simplifiés supposent, en dépit des apparences, un niveau d'expertise non négligeable (**Le Pochat 2005, p. 92**). La simplification porte en fait sur l'utilisation de bases de données génériques et sur l'expression des résultats, mais n'exempte pas l'utilisateur d'une solide posture critique à tenir vis-à-vis des mécanismes de simplification employés.

2.3.4 Typologies environnementales proposées par les outils

La description d'une typologie environnementale des produits doit permettre de choisir la ou les stratégies les plus efficaces et les mieux adaptées au produit à reconcevoir. Les outils d'éco-conception existants offrent plusieurs typologies légèrement variables, que l'on peut résumer de la façon suivante (Tableau 6). Huit types de produits sont distingués par **Crul & Diehl (2009)** : actif ou passif (i.e. consommateur d'énergie), mobile ou immobile (i.e. transporté pendant l'usage), nécessitant des consommables, à faible durée de vie. Dans le guide ECOFAIRE, la fiche « Check-list de recherche de solutions par catégorie de produit » présente six catégories de produits, incluant les équipements industriels, ainsi qu'une

distinction entre produit de longue durée de vie à faible masse comme le textile, ou de masse importante tel le mobilier (**ECOFAIRE, 2008**). Le guide Eco-Design Pilot s'appuie quant à lui sur une typologie de produit de A à E en lien direct avec les étapes du cycle de vie (**Wimmer & Zust, 2003**).

Outil	Manuel D4S (Crul & Diehl, 2009)	Outil ECOFAIRE (ECOFAIRE, 2008)	EcoDesign Pilot (Wimmer & Zust, 2003)
Typologie	Actif	Longue durée vie/Masse importante	A : Raw material intensive
	Passif	Longue durée vie/Faible masse	B : Manufacture intensive
	Mobile	Faible durée de vie/jetable	C : Transportation intensive
	Immobile	Consommateur important /en utilisation (énergie ou consommable)	D : Use intensive
	Consommable	Packaging	E : Disposal intensive
	Faible durée de vie	Equipements industriels	

Tableau 6: Comparaison de typologies environnementales de produits

2.3.5 Utilité opérationnelle des méthodes et outils

En utilisant des méthodes et outils, les concepteurs espèrent pouvoir gagner un temps précieux sur la réalisation des tâches, alors qu'ils subissent une pression considérable au quotidien. Les bénéfices potentiels apportés par l'outil doivent donc être évidents et compréhensibles de façon immédiate (**Lindhal, 2006**).

Aux yeux du concepteur, l'utilité opérationnelle de l'outil se définit à l'aide de deux critères dépendants : la **qualité de l'outil** et la **qualité du résultat**. Ces critères sont en partie subjectifs et liés au contexte d'utilisation, ce qui rend leur évaluation délicate. La capacité à juger de la fiabilité et de la pertinence d'un résultat varie en effet avec l'expérience et la connaissance de l'outil qu'en possède l'utilisateur (**Lindhal, 2006**).

L'intérêt d'un outil d'éco-conception est d'aider les concepteurs à mettre en lumière les problèmes environnementaux (**Ritzen, 2000**). Dans les phases amont du développement de

produit, il s'agit de donner aux concepteurs des indications judicieuses de direction stratégique, puis d'accompagner plus précisément la démarche dans les phases aval (**Lindhal, 2006**). La compatibilité des méthodes et outils d'éco-conception avec les outils de modélisation 3D et les autres outils d'ingénierie couramment utilisés par les concepteurs est un impératif à l'utilisation réelle et régulière de ces outils (**Lindhal, 2006 ; Knight & Jenkins, 2009**).

Les exigences des concepteurs sont reprises par **Neves Puglieri & Ometto (2011)** afin d'analyser des outils dérivés des méthodes QFD et AMDEC. Les critères retenus sont la facilité d'utilisation, le coût, le degré de validation industrielle, le temps de mise en œuvre, la visualisation et la possibilité de compromis avec d'autres critères de conception. **Lindahl (2005)** insiste sur le caractère d'**utilisabilité** (« usability ») qui caractérise la compréhension d'un utilisateur vis-à-vis des qualités d'usage d'un outil. Cela recouvre les deux critères précédemment cités, à savoir la facilité à être appris et utilisé (« easy to learn and use») et le temps de mise en œuvre. A cela s'ajoutent la compatibilité des outils avec peu de données d'entrée et la favorisation d'une utilisation multidisciplinaire. **Fagnoli & Kimura (2006)** relèvent six critères de choix opérationnel d'un outil d'éco-conception, parmi lesquels figure à nouveau l'utilisabilité. Au niveau technique, l'outil doit permettre d'évaluer efficacement les performances environnementales du produit et de trouver de nouvelles solutions. Au niveau organisationnel, l'outil doit s'intégrer au processus de développement de produit existant tout en permettant de gérer l'avancement de la conception.

Si ces critères d'utilité opérationnelle ont une influence importante sur l'utilisation effective des outils en milieu professionnel, ils ne rendent pas compte de la dimension sociale et cognitive de l'activité d'éco-conception que nous abordons maintenant.

2.3.6 Rôle social et cognitif des méthodes et outils

Lindhal (2006) évoque les sentiments de confiance et de satisfaction du travail accompli inspirés aux concepteurs par les outils. Du fait de la complexité de l'activité d'éco-conception, il existe un risque d'oublier certains éléments importants. L'approche systématique des tâches que peut proposer un outil est un moyen de limiter ce risque

(**Akermark, 2005**), et donc d'augmenter la confiance des concepteurs dans leur travail. Les méthodes et outils jouent un rôle dans la fixation de la mémoire collective et des connaissances d'une entreprise, créant ainsi des espaces de sauvegarde des savoir-faire («*know-how back-ups*»). A un niveau individuel, les concepteurs intègrent plus ou moins consciemment les nouvelles méthodes à des méthodes plus anciennes, qui ne sont ainsi jamais réellement oubliées (**Lindhal, 2006**). Les méthodes et outils d'éco-conception jouent enfin un rôle de support dans la collaboration et la communication entre les acteurs de la conception (**Ritzen, 2000 ; Akermark, 2005 ; Lindhal, 2005**).

Nous en concluons que les concepteurs ont une position humaine ambivalente par rapport à l'utilisation des méthodes et outils. S'ils souhaitent être guidés efficacement dans leur travail, ils revendiquent dans le même temps une certaine autonomie d'action qui demande à être prise en considération.

2.3.7 Complexité de mise en œuvre des outils

Tischner (2001) propose d'informer le concepteur sur la complexité de mise en œuvre des différents outils d'éco-conception et de sustainable design (Figure 21). L'objectif pragmatique est de pouvoir sélectionner un outil qui corresponde à la fois à l'expertise de l'utilisateur et à la phase de développement du produit en cours.

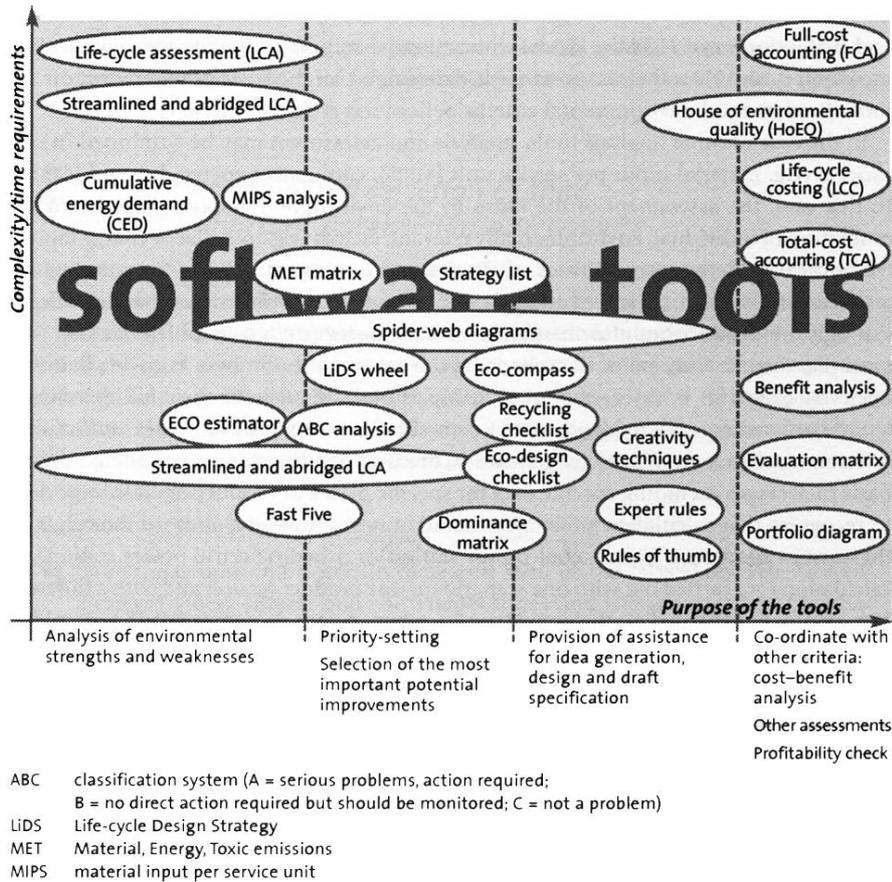


Figure 21: Classification des outils d'éco-conception et de sustainable design (**Tischner, 2001**)

Cette représentation synthétique en fonction du temps de prise en main est reprise pour caractériser les méthodes d'évaluation environnementale (**Bovea & Perez-Belis, 2012**). La nature (qualitative; semi-quantitative; quantitative) des résultats obtenus y apparaît de façon complémentaire (Figure 22). Les deux représentations apprécient de façon cohérente un temps de mise en œuvre croissant entre la réalisation d'une ACV simplifiée, l'utilisation de listes de contrôle et le déploiement d'une ACV complète.

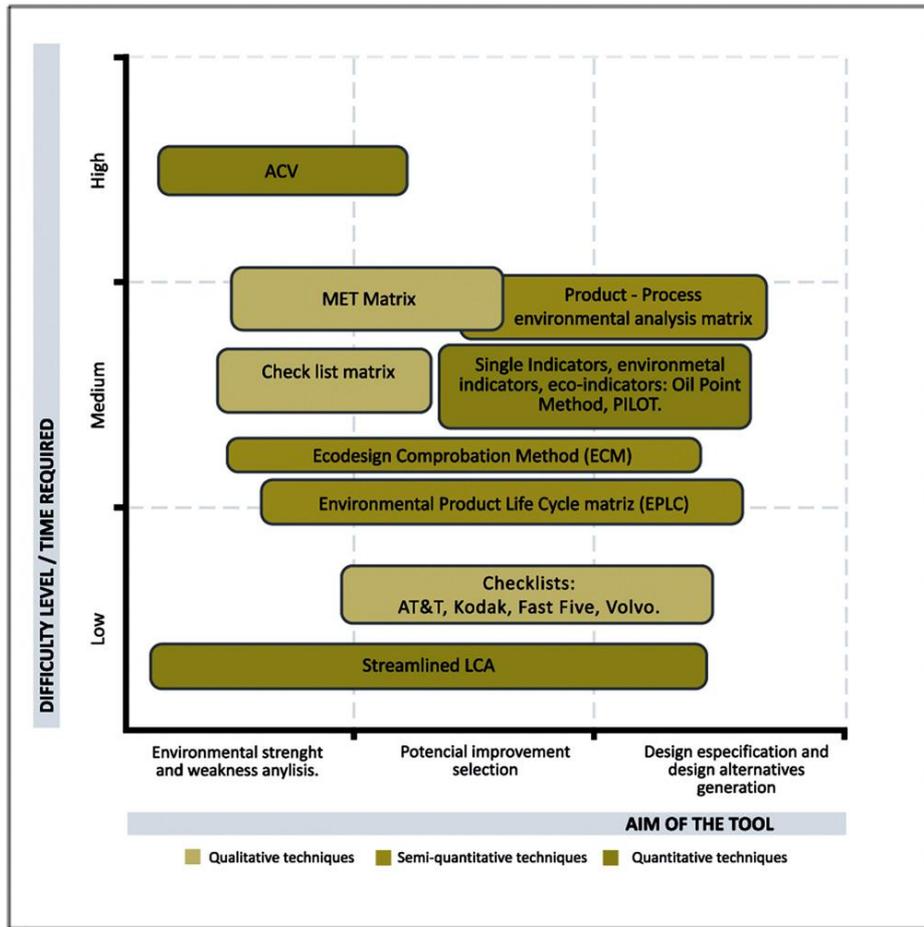


Figure 22: Classification des outils d'évaluation environnementale (Bovea & Perez-Belis, 2012)

2.3.8 Synthèse: difficulté de caractérisation des méthodes et outils d'éco-conception

Suite à cette revue des méthodes et outils d'éco-conception génériques nous retenons d'abord qu'il existe une grande diversité de l'offre. Sans volonté d'exhaustivité nous avons présenté quatre types d'outils d'éco-conception : les outils-radars, les outils matriciels, les guides méthodologiques et les outils analytiques comme l'Analyse de Cycle de Vie. L'accent a été mis sur les guides ou manuels d'éco-conception regroupant (le plus souvent) plusieurs outils élémentaires en étapes structurées. Si ces outils ne permettent pas une pratique très en profondeur du fait de leur généricité, ils semblent présenter l'avantage de faciliter les échanges dans les équipes projet et d'être des supports de formation efficaces. Nous serons amenés à étayer ce positionnement dans la partie expérimentale de nos travaux.

La diversité des approches est somme toute bénéfique car des angles d'attaque variés permettent d'enrichir les approches d'éco-conception. Du fait d'adaptations, parfois mineures, chaque outil peut donner lieu à de multiples variantes, ce qui rend ce panorama d'outils difficile à cerner pour les usagers potentiels. Selon **Jacqueson (2002)**, les classifications parviennent à donner une bonne vision d'ensemble des outils et de leur performance. En revanche, le fait de pouvoir identifier les ressources méthodologiques adaptées aux besoins propres des entreprises semble problématique (**Jacqueson, 2002**).

Il est difficile de rendre cette offre compréhensible pour les concepteurs grâce une catégorisation homogène et parlante. Nous avons vu que les catégories pouvaient privilégier (voire mélanger) le mode de présentation visuel, l'objectif de l'outil, l'outil natif qui a été modifié (par exemple QFD), l'étendue du cycle de vie traité. Les descriptions qui font mention d'un niveau d'expertise ou d'une facilité de prise en main sont plus rares, et ne concernent qu'une seule dimension comme la position au cours du PDP pour **Tischner (2001)**. Plus généralement les critères mis en avant ne sont pas assortis d'un niveau de progression. Or nous pensons que progresser en éco-conception passe par l'acquisition d'une vision globale des supports méthodologiques existants et des problèmes qu'ils permettent de traiter. En situation d'apprentissage, les descriptions proposées semblent insuffisantes pour permettre aux concepteurs de se forger cette vision d'ensemble.

2.4 Problématique détaillée

Les verrous que nous avons mis en évidence dans ce chapitre sont les suivants.

- Bien que mieux connue du grand public par certains de ses aspects (**CREDOC, 2012**), la dimension environnementale reste difficile à cerner en conception, notamment du fait du nombre et de la difficulté de compréhension de certains facteurs et de leurs interdépendances. Comment faut-il aborder cette question de façon progressive, sans décourager les concepteurs dans leur cheminement?
- Les concepteurs doivent d'une part connaître et maîtriser les méthodes, outils et pratiques de la conception traditionnelle. A ces derniers viennent s'ajouter la multiplicité des outils d'éco-conception, qu'il est illusoire de vouloir maîtriser en intégralité. Comment intégrer les outils de l'éco-conception dans les cursus de formation? Quels outils choisir, pour développer quels savoir-faire individuels et collectifs? Comment faire en sorte que les outils soient appropriés par les concepteurs en fonction de leur expertise en éco-conception et de leur profil de formation?
- La création de connaissances est, par essence, en constante évolution. Cela est d'autant plus vrai pour des connaissances environnementales dont on constate les avancées rapides d'année en année. Comment envisager une progression dans la formation en éco-conception qui fasse sens en regard des problématiques traitées?

Nous pensons qu'il est possible d'éveiller les concepteurs aux problématiques environnementales et de les former aux méthodes et outils adhoc dans le cadre de la formation. Le but est de faciliter, in fine, la prise en compte de critères environnementaux au cours du PDP en situation professionnelle. Dans le contexte de l'entreprise, nous avons vu que l'intégration pérenne de la dimension environnementale supposait de mettre en place des logiques d'apprentissage organisationnel supportées par des outils de pilotage dédiés (**Jacqueson, 2002**), ou par la co-création d'un outil méthodologique dit « troyen » (**Reyes, 2007**). Nous faisons le choix de travailler dans le cadre de la formation en ingénierie de

conception. Outre son accessibilité, ce terrain de recherche présente l'avantage de nous affranchir de contraintes organisationnelles fortes liées à l'obligation de résultats ou à la pression des délais. Mais nous sommes alors amenés à formuler une hypothèse de travail. **Cette hypothèse de travail suppose une équivalence entre les observations en milieu industriel relatées dans l'état de l'art et les observations que nous mettons en œuvre en milieu académique.**

Nous nous proposons à présent de répondre à la question de recherche suivante (Figure 23):

Comment caractériser les bonnes pratiques de l'éco-conception pour favoriser la formation des ingénieurs de conception ?

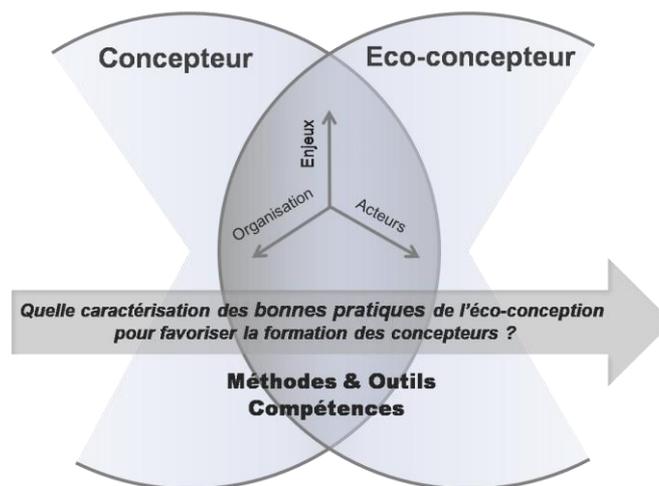


Figure 23: Synthèse de la problématique

3. HYPOTHESES ET METHODE DE RECHERCHE

Dans ce chapitre nous énonçons les hypothèses de recherche issues de la problématique. L'hypothèse générale sert de fondement à la proposition de recherche et fait appel à un référentiel d'activité d'éco-conception. Après en avoir explicité la construction, nous mettons le référentiel à l'épreuve pour caractériser une sélection d'outils d'éco-conception. Le maillage des études expérimentales qui s'appuient sur le référentiel vient clore le chapitre.

3.1 Hypothèses de recherche

3.1.1 Hypothèse générale: référentiel d'activité en éco-conception

L'hypothèse générale concerne les conditions de mise en place et d'accompagnement d'une formation à l'éco-conception.

En phase de démarrage, pour être capable de construire un dispositif d'apprentissage, il faut avoir une vision globale des objectifs poursuivis. Inspiré par l'approche de **Jacqueson (2002)**, nous pensons que cette vision globale doit s'appuyer sur un mode de représentation pertinent et compréhensible, capable de rendre compte des multiples dimensions de l'activité d'éco-conception. Les éléments descriptifs retenus sont regroupés au sein d'une représentation que nous appellerons « référentiel ». Pour mémoire un référentiel permet, en physique, de « *situer un événement dans l'espace et le temps* »³ ce qui est cohérent avec notre vision de l'éco-conception. Ainsi l'hypothèse générale est formulée de la façon suivante :

« Il est possible d'établir un référentiel d'activité pour caractériser la pratique de l'éco-conception, à l'aide de dimensions et de niveaux progressifs ».

³ Petit Larousse 2010, Ed. 2009, p. 866. Paris : Larousse. C'est aussi en enseignement un « *document établissant avec précision les exigences à satisfaire pour l'obtention d'un diplôme* ».

3.1.2 Hypothèse 1 : Utilisation des outils d'éco-conception

La première hypothèse est issue du rôle avéré que jouent les méthodes et outils d'éco-conception dans l'appropriation des enjeux environnementaux par les concepteurs lors de la conception de produits et services. Nous avons vu précédemment que les outils sont de nature diverses et couvrent des objectifs variés. Ils permettent de structurer le déroulement des démarches d'éco-conception grâce à des activités qui sont encore peu analysées en recherche. L'organisation thématique des activités, que nous dénommons "éco-activités" s'appuie sur le référentiel d'éco-conception mentionné dans l'hypothèse générale.

Notre première hypothèse s'énonce ainsi :

«L'utilisation d'outils d'éco-conception permet de caractériser les bonnes pratiques de l'éco-conception en révélant l'existence d'éco-activités déclinables sur le référentiel d'activité».

3.1.3 Hypothèse 2 : Formalisation des compétences d'éco-conception

La seconde hypothèse concerne le déroulement de l'activité d'éco-conception pratiquée en groupe multidisciplinaire, dont on cherche à extraire l'essence. Pour cela nous supposons qu'il faut acquérir des **compétences** qui permettent aux acteurs d'avancer dans la démarche de conception des produits en prenant en compte la dimension environnementale. La seconde hypothèse s'exprime donc par :

«La formalisation des compétences permet de caractériser les bonnes pratiques de l'éco-conception. Ces compétences peuvent être décrites à l'aide du référentiel d'activité».

3.2 Proposition d'un référentiel d'activité d'éco-conception

3.2.1 Ancrage du référentiel

Afin de construire un référentiel de description de l'activité d'éco-conception, nous choisissons de prendre appui sur des modèles existants en conception, pour lesquels les questions du processus et de son contexte sont traitées conjointement. Il nous apparaît

pertinent de considérer l'éco-conception dans son contexte à la fois technique et humain (**Boks, 2006**).

La vision de **Visser (2009)** présente l'intérêt de décrire l'activité de conception en mettant le concepteur au cœur de cette dernière. Pour autant cette vision ne nous semble pas totalement satisfaisante dans la mesure où le concepteur y est représenté individuellement, alors que la pratique de la conception (comme de l'éco-conception) est rarement individuelle. **Dorst (2008)** prend en charge cette dimension collaborative dans un cadre descriptif à quatre entités : Objet (ou problème de conception), Acteur (individuel ou collectif), Contexte et enfin Processus (ou dynamique des activités de conception).

Le **modèle d'aide à la sélection de méthodes de conception** de **Lahonde (2010)** (Figure 24) nous intéresse par le fait qu'il rattache le choix de méthodes et outils de conception à des éléments de contexte (environnement, marché, entreprise, projet, processus, concepteur). La dimension « Méthode » est quant à elle caractérisée par quatre attributs : Intitulé, Catégorie, Ressources et Connexions. Or certains des ingrédients contextuels relevés ici sont également apparus au cours de l'analyse bibliographique de l'activité d'éco-conception.

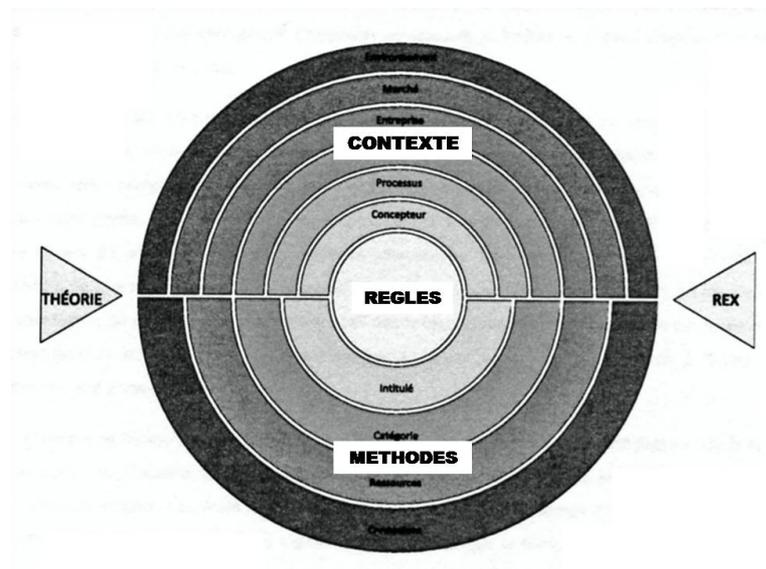


Figure 24: Modèle d'aide à la sélection des méthodes de conception (**Lahonde, 2010**)

3.2.2 Sélection et caractérisation des dimensions représentatives de l'éco-conception

Pour être utile et compréhensible, le référentiel doit être composé d'un nombre réduit de points de vue pertinents (ou *dimensions*) et indépendants sur la pratique de l'éco-conception. Les limites de capacité de mémorisation de l'être humain préconisent l'usage de trois à cinq dimensions (**Cowan, 2001**). De plus, pour permettre de visualiser une progression, il est nécessaire de proposer des *niveaux* internes à chaque dimension. Comment prendre en compte les spécificités de la vision environnementale pour construire un référentiel dédié? Le premier ensemble de dimensions choisi regroupe les deux notions pivots que nous avons mises en évidence au chapitre 2.1, à savoir : la Modélisation des Cycle de Vies et le Choix et la Gestion des Critères environnementaux. Le second jeu de dimensions fait apparaître l'Intégration des Parties Prenantes, qu'elles appartiennent à la sphère industrielle ou civile. En croisant les modèles de conception avec les éclairages de l'état de l'art, nous retenons finalement un troisième jeu de dimensions contextuelles et stratégiques: la Remise en Cause des produits et services et la Gestion du Processus d'éco-conception. Nous représentons l'ensemble des six dimensions sur la Figure 25. La représentation circulaire en rosace nous paraît la mieux adaptée pour rendre compte de la multiplicité et de la complexité des thématiques sous-jacentes à la pratique l'éco-conception. Nous obtenons ainsi une vision formelle cohérente de l'activité.

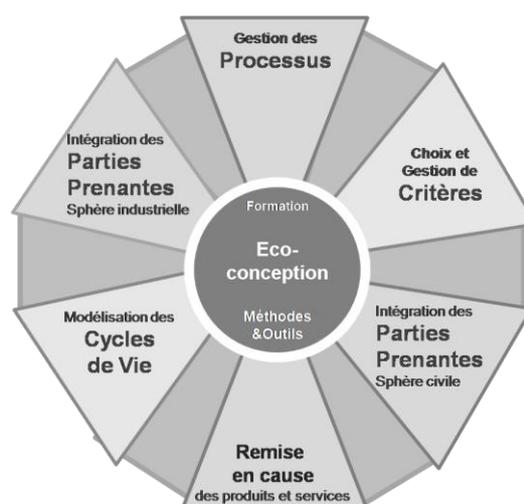


Figure 25: Dimensions envisagées pour le référentiel d'éco-conception

3.2.3 Dimensions liées au Processus de Développement de Produits

Ces deux dimensions résultent de la définition de l'éco-conception (**AFNOR, 2003**), cf. 1.3.1.

3.2.3.1 Modélisation des Cycles de vie

L'apprentissage de l'éco-conception nécessite de définir quelles étapes du cycle de vie du produit l'on va prendre en considération pour en réduire les impacts environnementaux. Il est possible d'étudier un **cycle partiel** (cf. DfX) ou le **cycle de vie complet** d'un produit du "berceau à la tombe" ("cradle to grave"). Il devient nécessaire de **modéliser plusieurs cycles de vie** dans le cas du remanufacturing de produits, au cours duquel plusieurs cycles d'usage sont considérés. **Amaya et al. (2010)** abordent cette question en proposant un outil qui permet la comparaison de scénarios de remanufacturing à une, deux ou trois phases d'usage consécutives. L'exploration de scénarios d'upgradabilité apparaît aussi dans les travaux de **Pialot et al. (2011)**.

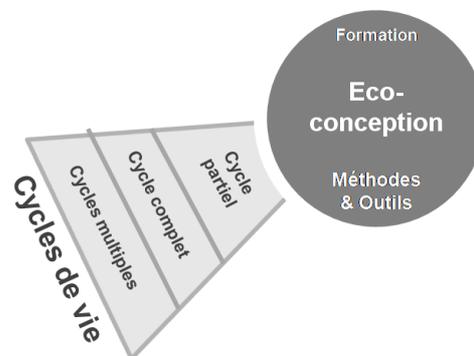


Figure 26: Dimension «Modélisation des Cycles de Vie»

3.2.3.2 Choix et Gestion des Critères environnementaux

L'apprentissage de l'éco-conception nécessite de définir et de partager des critères d'évaluation de la performance environnementale compréhensibles et pertinents pour le cas d'étude. Le plus simple (et le plus limitatif) est d'utiliser un ou plusieurs **critères techniques** ayant un sens pour la réduction d'impacts comme la masse ou la consommation

d'énergie (**De Wulf, 2003**). Une plus ample connaissance des phénomènes d'impacts locaux et globaux permet d'utiliser un éventail de plusieurs critères à la fois **environnementaux** (par exemple émissions de gaz à effet de serre) **et techniques**. L'élargissement à une vision de Développement Durable conduit à compléter ce spectre par des **critères éthiques et sociaux**. C'est ce que proposent **Gupta et al. (2011)** dans le domaine du Sustainable Manufacturing.

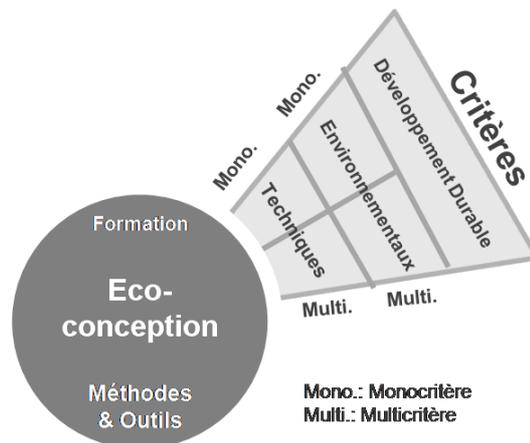


Figure 27: Dimension «Choix et Gestion des Critères environnementaux»

3.2.4 Dimensions liées à la chaîne de valeur

Nous avons vu que les parties prenantes expriment une grande diversité de points de vue et d'appartenance. Dès lors, comment les regrouper selon des niveaux qui aient un sens pour l'éco-conception?

3.2.4.1 Intégration des parties prenantes de la sphère industrielle

L'apprentissage de l'éco-conception nécessite de définir quels acteurs de la sphère industrielles sont concernés par la mise en place de la démarche. Ce sont les parties prenantes «verticales» (**Dreux-Gerphagnon & Haoues, 2011**). A un premier niveau -insuffisant au demeurant- la dimension environnementale est portée par un ou plusieurs **experts en environnement**. A un second niveau, l'**équipe de conception** se trouve engagée aux côtés du (ou des) expert(s) en environnement. A un troisième niveau, il s'agit d'impliquer l'entreprise ainsi que ses fournisseurs, c'est-à-dire l'**entreprise étendue**. A l'échelon ultime, plusieurs

entreprises collaborent pour former un **éco-système industriel**, comme dans le complexe modèle de Kalunborg⁴.

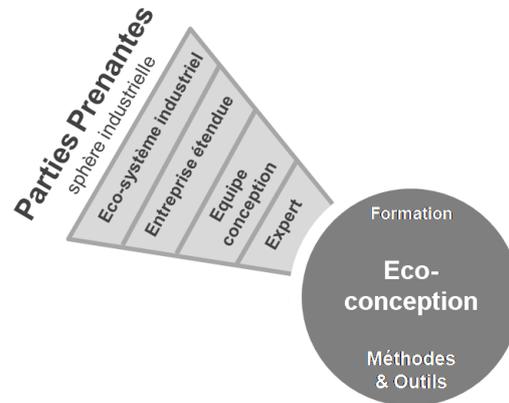


Figure 28: Dimension «Intégration des Parties Prenantes Industrielles»

3.2.4.2 Intégration des parties prenantes de la sphère civile

L'apprentissage de l'éco-conception nécessite également de préciser quels acteurs de la société civile sont consultés en vue de réduire les impacts environnementaux et d'identifier les gisements de valeur potentiels au niveau de produits. L'identification d'un empilement par niveaux s'appuie sur les partenaires potentiels et l'organisation de la société civile (**UNEP, 1994**). Nous préconisons donc, pour cette dimension : les clients finaux, puis les communautés (e.g. Organisations Non Gouvernementales, média, gouvernements locaux), et enfin les organismes d'état (e.g. ADEME, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie). A titre d'exemple, le respect des directives européennes traduit le fait que l'Union Européenne est une partie prenante obligatoirement prise en compte lors de la conception des classes de produits visés par lesdites directives.

⁴ Kalunborg est une ville portuaire du Danemark qui fonctionne sur le principe de *symbiose* ou *d'écosystème industriel* depuis 30 ans. Chaque usine du complexe se nourrit des rejets des usines voisines, dans le but d'optimiser les ressources en eau, en énergie et en déchets. Pour exemple parmi de nombreux échanges, la raffinerie de pétrole fournit de l'eau usée pour refroidir la centrale électrique, laquelle vend de la vapeur à la municipalité de Kalunborg pour le chauffage.

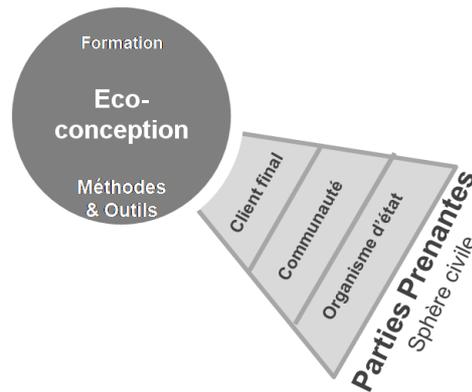


Figure 29: Dimension « Intégration des Parties Prenantes Civiles »

3.2.5 Dimensions contextuelles de l'éco-conception

3.2.5.1 Remise en cause des produits et services

L'apprentissage de l'éco-conception requiert de spécifier le niveau de remise en cause des produits et services qui est envisagé. Suivant **Brezet (1997)**, nous distinguons quatre paliers de progression : **amélioration produit, reconception produit, innovation fonctionnelle** et **innovation de systèmes de produits**. L'amélioration environnementale rend simplement un produit conforme à la réglementation en vigueur. Le produit restant inchangé, la reconception suppose la remise en cause de certaines caractéristiques prises isolément (par exemple matériaux) ou de certains composants. L'innovation fonctionnelle mène à un changement de technique ou d'usage dans la manière de satisfaire la fonction. L'innovation systémique conduit à de nouveaux produits et services, impliquant par là même des modifications d'infrastructures et d'organisation des entreprises.

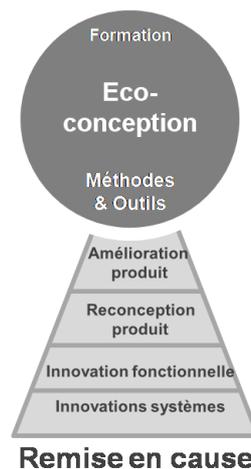


Figure 30: Dimension « Niveau de Remise en cause des produits et services »

3.2.5.2 Gestion du Processus d'éco-conception

L'apprentissage de l'éco-conception nécessite de mener en groupe multidisciplinaire un panel d'activités intégrées au PDP **AFNOR (2003)**. A chaque typologie d'activité correspond une famille d'outils d'éco-conception. **Millet et al. (2003)** regroupent les activités (et outils associés) suivant les objectifs synchronisés avec le déroulement du PDP:

- **Définition des Objectifs;**
- **Diagnostic environnemental** (recouvrant évaluation initiale et hiérarchisation des problématiques d'environnement);
- **Préconisation** (pour la recherche de solutions);
- **Evaluation environnementale;**
- **Représentation** des enjeux environnementaux;
- **Communication** interne ou externe sur les aspects environnementaux, les scénarios d'utilisation et de fin de vie recommandés.

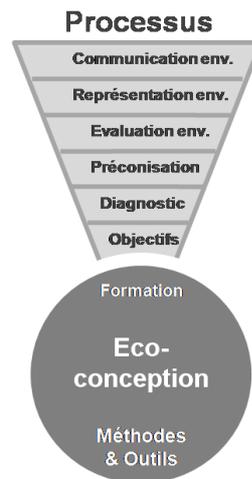


Figure 31: Dimension « Gestion du processus d'éco-conception »

Finalement, la première version du référentiel d'éco-conception se présente comme suit (Figure 32).

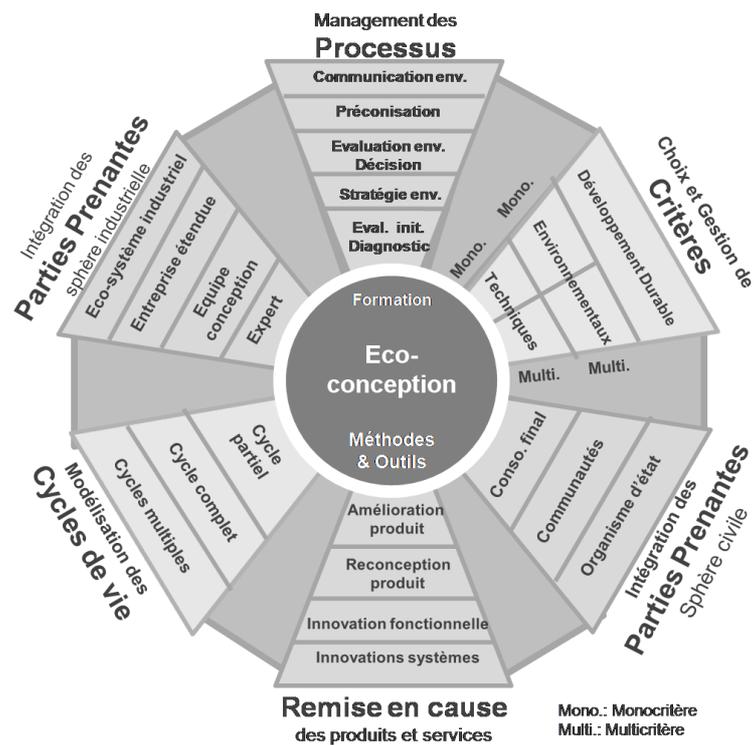


Figure 32: Dimensions et niveaux envisagés pour le référentiel d'éco-conception

3.3 Construction de la méthode de recherche

"Research is an evolving puzzle, and all the pieces (projects) necessary to solve the puzzle might not be seen from the beginning" (Tashakkori & Teddie, 2003, p. 198).

"Design research is very much like designing" (Valkenburg & Kleinsmann, 2009).

Nos travaux intègrent la démarche de recherche en conception connue sous le nom de Design Research Methodology (Blessing & Chakrabarti, 2009), où l'on peut distinguer trois étapes pivots : (1) Clarification ; (2) Etude descriptive I et II; (3) Etude prescriptive (Figure 33). Nous avons plus précisément mis en oeuvre un schéma de thèse de type II (Blessing & Chakrabarti, 2009, p. 18) comportant : (1) une étude bibliographique complète; (2) une étude descriptive I complète, grâce à quatre études expérimentales, dont trois sont détaillées dans le manuscrit; (3) une étude prescriptive initiale, avec une première validation des éléments de la proposition.

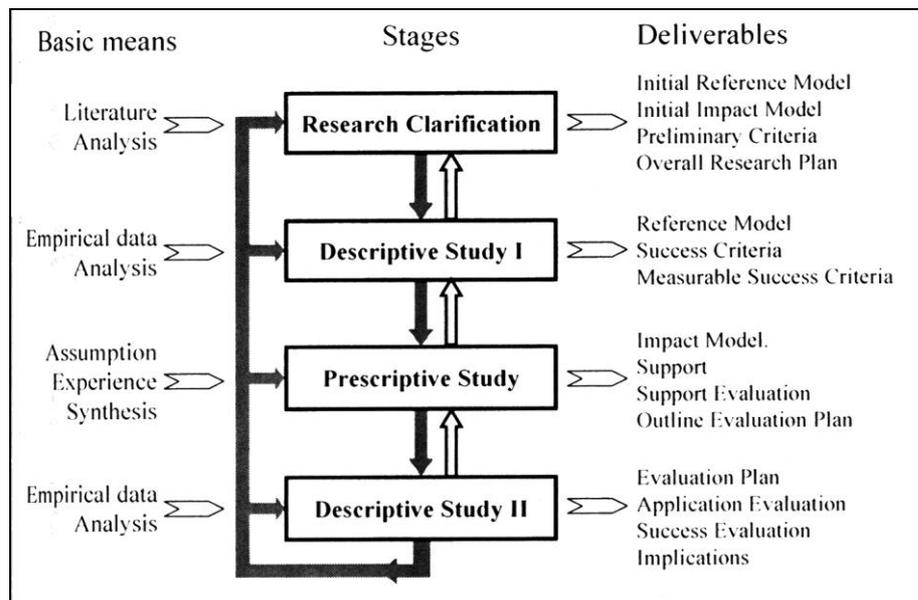


Figure 33: Design Research Methodology (Blessing & Chakrabarti, 2009)

3.3.1 Préambule: revue des approches empiriques en éco-conception

De très nombreux outils d'éco-conception sont créés depuis une quinzaine d'années, principalement en milieu académique, mais leur utilisation réelle auprès des praticiens est peu étudiée (**Baumann et al. 2002**). Après avoir recueilli des témoignages et énoncé des exigences du point de vue des concepteurs sur les méthodes et outils de Design for Environment (DfE), **Lindhal (2006)** livre une conclusion qui va dans un sens comparable : « *there is a need for a more detailed evaluation and comparison of how different methods and tools relate to designers' requirements for methods and tools* ». Il a donc été choisi d'analyser les approches expérimentales qui mettent en jeu des méthodes et outils d'éco-conception. D'autre part, la grille d'analyse que nous proposons a imposé l'examen de protocoles expérimentaux clairement documentés. Cela exclut donc les études de cas industriels, instructives au demeurant, pour lesquelles l'activité d'éco-conception n'a pas été étudiée dans des conditions établies. Nous incluons par contre les entretiens renseignant sur le rôle des méthodes et outils d'éco-conception dans la pratique quotidienne des ingénieurs de conception (**Lindhal, 2006**) (**Akermark, 2005**) (**Ritzen, 2000**). L'objectif de ce paragraphe est de faire émerger les sujets et questions de recherche traités par les chercheurs en éco-conception, et de les mettre en regard des méthodes de collecte de données choisies.

A cet effet nous retenons plusieurs attributs classiques de description (**Blessing & Chakrabarti, 2009**). Les visions expérimentales inscrites au cœur des deux grandes écoles de pensée en conception se distinguent, notamment, par leur caractère qualitatif ou quantitatif. Dans le cas qualitatif, c'est la nature des phénomènes observés qui importe. C'est au contraire la mesure de l'intensité des phénomènes observés qui est au centre des préoccupations des approches quantitatives.

Il s'offre au chercheur en conception deux façons principales de conduire une approche expérimentale en fonction des objectifs poursuivis: l'étude ethnographique ou l'expérimentation. La première se déroule souvent dans des conditions réelles de conception (« in vivo »), qu'il s'agisse de projets industriels avec des concepteurs professionnels ou de projets d'étudiants en cours d'apprentissage. Les expérimentations sont, quant à elles,

réalisées dans des conditions dites « contrôlées » ou « in vitro », permettant plus facilement de tester certaines hypothèses et variables **(Torlind et al., 2009)**.

Les méthodes de collecte de données peuvent être divisées en deux catégories. Les méthodes dites « temps réel » permettent l'acquisition des données pendant le déroulement de l'activité de conception observée, et comprennent par exemple l'observation pure, l'observation participative, la verbalisation simultanée ou encore le journal de bord. Les méthodes « rétrospectives » s'appuient sur l'examen différé des diverses traces de l'activité. Parmi les plus usités figurent les documents produits par les concepteurs (dessins, plans, fichiers numériques 3D etc.), les questionnaires ou les entretiens. Les méthodes en temps réel semblent être dominantes en laboratoire, lorsque seuls quelques cas sont à examiner. Les méthodes différées sont plus répandues en milieu industriel, ou sont utilisées en appoint des méthodes citées précédemment **(Blessing & Chakrabarti, 2009)**.

Enfin, indépendamment de leur nature qualitative ou quantitative, les approches expérimentales peuvent faire appel ou pas à une étape de codage **(Mc Donnell & Lloyd, 2009, p. 26)**. La robustesse de la démarche de codage est l'un des enjeux de taille auxquels sont confrontés les chercheurs. Il s'agit en effet de proposer un schéma de codage suffisamment explicite pour pouvoir être mis en oeuvre de façon robuste par plusieurs codeurs **(Torlind et al., 2009)**.

Le panorama des démarches empiriques (ANNEXE 2) montre que l'observation en temps réel est peu répandue en éco-conception, contrairement à la pratique d'entretiens ou de questionnaires. C'est l'approche que nous avons retenue pour nos travaux **(Vallet et al., 2009, Tyl et al. 2010 ; Vallet et al. 2011a)**.

3.3.2 Positionnement empirique: approche mixte

Les visions qualitative et quantitative, apparemment différenciées, peuvent être avantageusement associées pour dépeindre une image plus riche de l'activité de conception **(Blessing & Chakrabarti, 2009, p.79)**. L'approche résultante, dite « mixte », autorise l'utilisation combinée de données expérimentales qualitatives et quantitatives selon des

modalités variables (**Tashakkori & Teddie, 2003**). Sur la Figure 34 figurent trois schémas d'intégration (a), (b) et (c) (**Tashakkori & Teddie, 2003**).

- Cas (a) : les données qualitatives et quantitatives sont associées dans la phase de collecte des données et forment un ensemble mixte unique de données;
- Cas (b) : les données qualitatives et quantitatives, présentées séparément, sont comparées dans la phase de discussion des résultats;
- Cas (c) : les données qualitatives et quantitatives sont intégrées à chaque étape de la recherche, i.e. au cours de la collecte, de l'analyse des données et de la discussion.

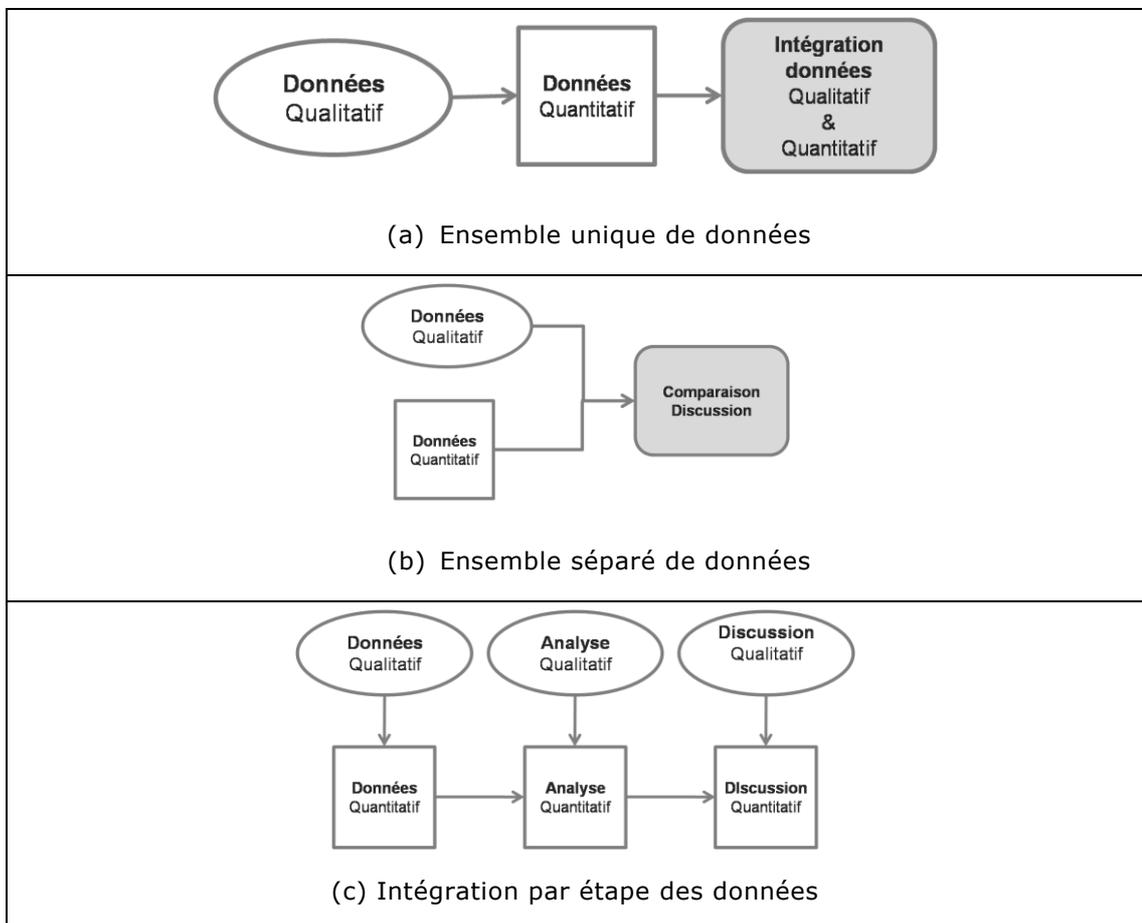


Figure 34: Trois modes d'intégration de données qualitatives et quantitatives, d'après (**Tashakkori & Teddie, 2003**)

L'approche mixte de type (b) est la voie que nous retenons pour ce travail de recherche, car nous souhaitons à la fois rendre compte de : (1) la réalisation de performances techniques en

éco-conception de produits ; (2) la perception de ce qu'est l'activité d'éco-conception pour ses acteurs. Ce type d'approche permet ainsi d'obtenir une **triangulation** des données et des analyses, c'est-à-dire de recueillir plusieurs points de vue concourants sur la définition des bonnes pratiques de l'éco-conception. Cela constitue l'un des enjeux centraux des études expérimentales à «petite échelle», grâce à la robustesse des procédures de contrôle et à l'auto-critique approfondie de la démarche (**Cash et al., 2012**). Par « petite échelle », nous entendons un nombre de groupes-échantillons inférieur à 10, constitués de 3 à 6 personnes.

3.3.3 Critères de qualité de la recherche en conception

Les critères ou règles de la recherche scientifique présentent des formulations qui diffèrent d'un auteur à un autre. Trois critères essentiels sont néanmoins mis en avant (**Miles & Huberman, 1994 ; Valkenburg & Kleinmann, 2009 ; Blessing & Chakrabarti, 2009**).

- La validité, servant à caractériser l'intégrité des résultats. Il importe de distinguer la **validité interne** (qui questionne les relations de causalité proposées par les résultats) de la **validité externe** (qui soulève la question de la généralisation possible des conclusions en d'autres lieux et circonstances).
- **La fiabilité** des résultats: une certaine stabilité des résultats doit être obtenue, ce qui suppose une redondance dans le protocole.
- **La reproductibilité** de l'étude expérimentale, caractérisant la possibilité de reproduire le protocole dans des conditions identiques très précisément documentées.

3.3.4 Maillage des études avec observation

Le travail empirique que nous avons mené s'appuie sur un jeu d'expérimentations avec observation effectuées entre mars 2009 et juin 2011. Les cas BARBARAZ, LUMINAIRE et MOBILITE sont le fruit d'une collaboration avec plusieurs chercheurs du réseau EcoSD. Nous présenterons en détail les études BARBARAZ, ASPI et LUMINAIRE dans ce chapitre (Tableau 7). L'expérimentation MOBILITE fait l'objet de travaux complémentaires en cours (non présentés dans ce texte, en grisé dans le Tableau 7). Chaque expérimentation contribue à la mise en lumière d'une à deux dimensions du référentiel. Notons que la dimension Cycle de

Vie n'a pas pu être examinée par une expérimentation adhoc faute de temps, mais pourra l'être dans de futurs travaux.

Pour l'heure, l'expérimentation BARBARAZ nous fournit matière à analyser le déroulement d'un processus d'éco-conception dans une phase de conception préliminaire (dimension **Gestion des Processus**). L'expérimentation LUMINAIRE est centrée sur la génération de concepts pour un luminaire d'extérieur installé au sol. Grâce à la mise en œuvre de plusieurs outils d'éco-conception et d'éco-innovation, il est possible d'étudier la variabilité du niveau de remise en cause de ce produit (dimension **Remise en Cause**). La question du choix des critères environnementaux en fonction du cadre d'utilisation et des destinataires potentiels de l'étude est traitée plus en profondeur dans l'expérimentation MOBILITE, où il s'agit d'évaluer diverses solutions de mix énergétique pour un véhicule électrique (dimension **Choix et Gestion des Critères**). Sur un cas de reconception d'aspirateur, l'expérimentation ASPI permet d'approfondir la question du processus et d'examiner l'influence de la prise en compte des parties prenantes (civiles et industrielles) en complément de l'approche classique en cycle de vie par des étudiants-ingénieurs novices en éco-conception (dimension **Intégration des Parties Prenantes Civiles et Industrielles**).

Expérimentation	BARBARAZ	LUMINAIRE	MOBILITE	ASPI
	Expert	Expert	Expert	Novice
Date	Mars 2009	Mars 2010	Mars 2011	Février 2011
Produits étudiés	Rasoir jetable	Luminaire d'extérieur	Véhicule électrique	Aspirateur
Dimension	Cycles de Vie			
	Critères		x	
	Parties Prenantes Industrielles			x
	Parties Prenantes Civiles			x
	Remise en cause		x	
	Processus	x		

Tableau 7: Contribution des études empiriques aux dimensions du référentiel

Sur la Figure 35, nous représentons l'approche empirique en regard de nos trois hypothèses de recherche (cf. 3.1). Aux études avec observation s'ajoutent une revue bibliographique des méthodes et outils d'éco-conception et des entretiens de validation.

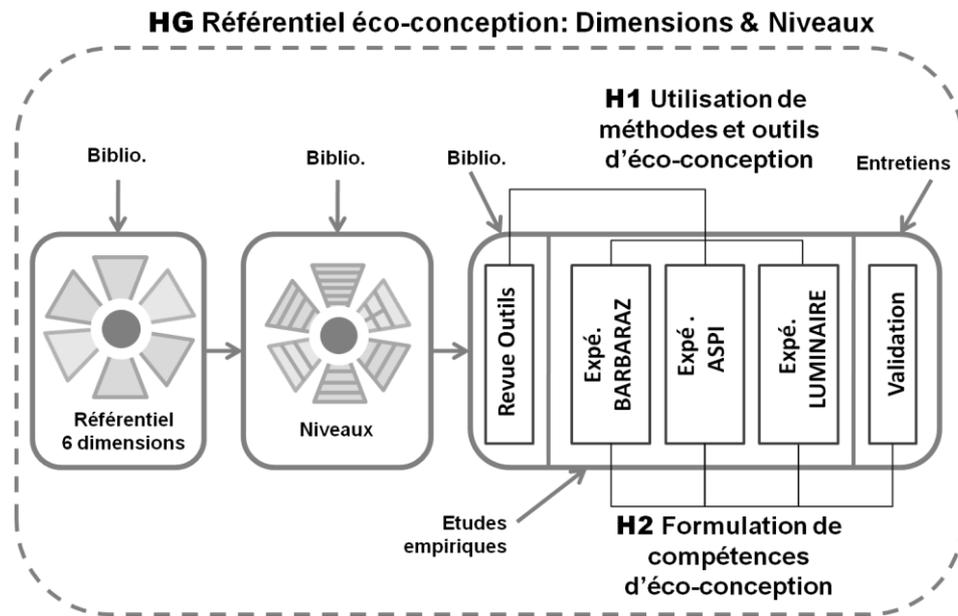


Figure 35: Synthèse de l'approche empirique

3.4 Appropriation de la méthode de recherche

Dans ce paragraphe, nous relatons l'appropriation de la méthode de recherche en deux étapes préliminaires regroupées sous le terme "Revue Outils" (Figure 36). Nous faisons une première mise à l'épreuve du référentiel pour caractériser un panel représentatif d'outils d'éco-conception. Puis nous illustrons une utilisation possible du référentiel. Pour cela nous introduisons le degré de couverture thématique d'un cursus de formation à l'éco-conception existant.

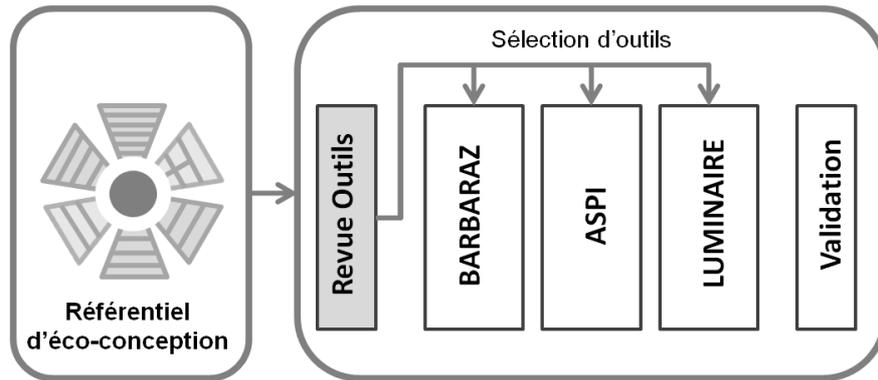


Figure 36: Appropriation de la méthode de recherche

3.4.1 Etude descriptive des méthodes et outils d'éco-conception

3.4.1.1 Cadrage de l'étude

Afin de tester l'actionnabilité du référentiel, nous réalisons l'**étude descriptive** d'une trentaine d'outils d'éco-conception existants sur une grille comportant les dimensions et niveaux associés. Les questions associées à chaque dimension sont posées comme suit.

1-Modélisation des Cycles de vie: quelles sont les étapes du cycle de vie, ou quels sont les cycles de vie des produits/systèmes pris en compte par l'outil ?

2-Choix et Gestion de Critères: quels sont les critères d'évaluation proposés par l'outil?

3-Intégration des Parties prenantes de la sphère industrielle: à quels acteurs-utilisateurs de la sphère industrielle les outils sont-ils destinés en priorité ?

4- Intégration des Parties prenantes de la société civile: quelle est la ou les parties prenantes civiles dont le point de vue est (sont) exprimé(s) dans l'outil ?

5-Remise en cause des produits et services: à quel niveau de remise en cause du produit l'outil se situe-t-il ?

6-Gestion du Processus d'éco-conception: quelles sont les étapes du processus d'éco-conception abordées par l'outil?

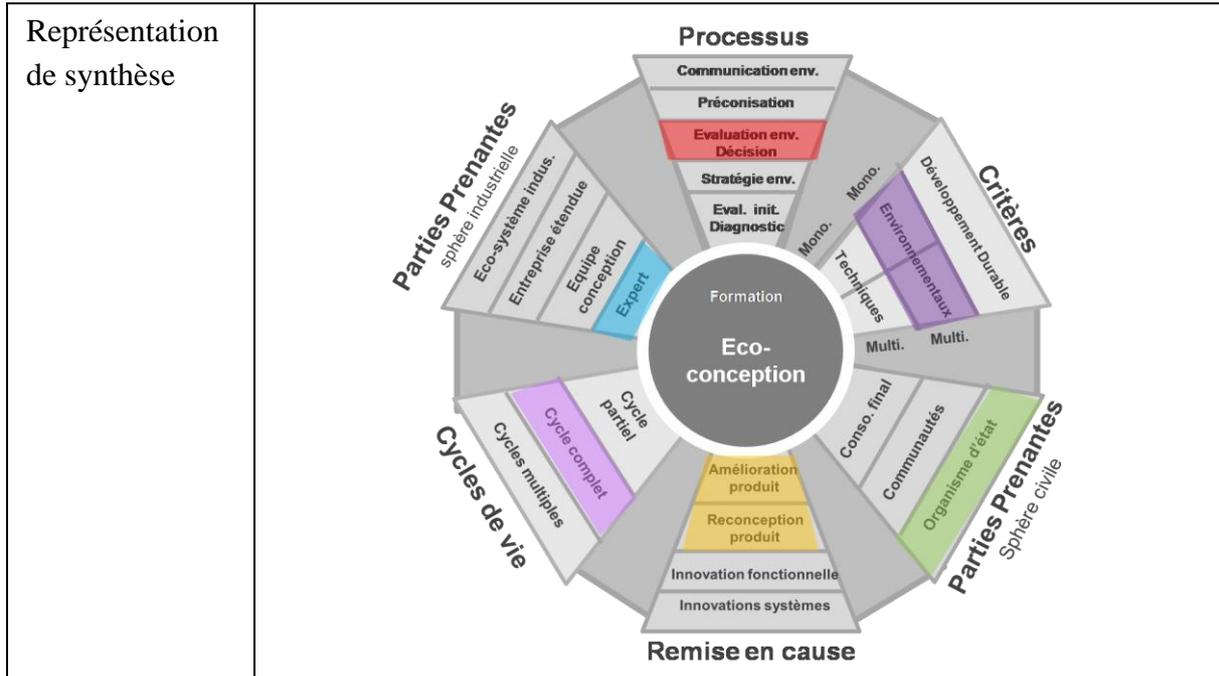
A titre d'exemple, nous entrons dans le détail de la caractérisation de deux outils mis en œuvre lors des expérimentations: SimaPro et Eco-Design PILOT. La description d'outils appartenant aux autres catégories figure en ANNEXE 2.

3.4.1.1 Résultats: caractérisation d'outils

Pour illustrer la démarche de caractérisation, nous choisissons deux types d'outils d'éco-conception: un outil d'Analyse de Cycle de Vie et un guide d'éco-conception. La caractérisation d'un outil d'ACV utilise les analyses de **Grisel & Osset (2004)** (Tableau 8).

Tableau 8: Caractérisation d'un outil d'ACV grâce au référentiel d'éco-conception

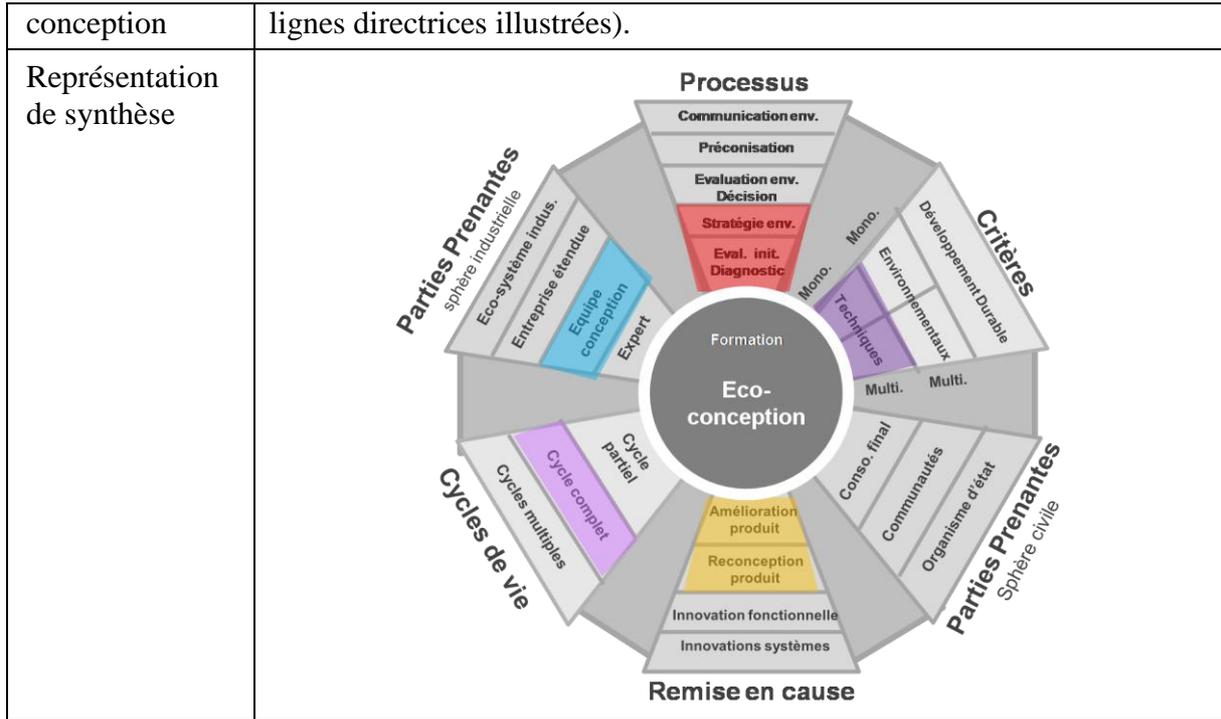
Outil : SIMAPRO (ACV)	
Dimension	Commentaires
Cycle de vie	L'utilisation d'un logiciel d'ACV suppose d'avoir une vision du cycle de vie complet du ou des produits, de l'extraction des matériaux à la fin de vie.
Critères	Les critères proposés pour caractériser les impacts potentiels du produits sont multiples , et relèvent à la fois du domaine « technique » et purement environnemental . Il appartient au praticien ACV de choisir les critères d'impacts pertinents pour la catégorie de produit considérée.
Parties Prenantes industrielles	La mise en œuvre d'un outil d'ACV est réservée à un profil expert en environnement . Néanmoins, la collaboration avec d'autres métiers est indispensable pour recueillir des données d'entrée pertinentes.
Parties Prenantes civiles	Il n'y a pas de point de vue de parties prenantes civiles privilégiées exprimées dans un logiciel d'ACV. Notons tout de même que des organisations de consommateurs, des syndicats professionnels ou des agences gouvernementales peuvent être commanditaires ou utilisateurs des résultats d'une étude d'ACV (Grisel & Osset, 2004).
Remise en cause	En mettant au premier plan les matériaux, les processus de fabrication et les scénarios de fin de vie, l'utilisation d'un logiciel d'ACV permet une remise en cause limitée du produit : amélioration ou reconception .
Processus d'éco-conception	L'utilisation d'un logiciel d'ACV est clairement positionnée sur la phase d' évaluation environnementale à un stade avancé de la conception.



Pour caractériser l’outil EcoDesign PILOT (Tableau 9), nous avons recours à notre propre expérience de l’outil, ainsi qu’à la présentation de **Wimmer et al. (2001)**.

Tableau 9: Caractérisation de l’outil EcoDesign PILOT grâce au référentiel d’éco-conception

Outil : EcoDesign PILOT	
Dimension	Commentaires
Cycle de vie	EcoDesign PILOT s’appuie sur une vision en cycle de vie complète.
Critères	Les critères utilisés dans EcoDesign PILOT ont trait à des masses, des consommations énergétiques, des volumes de déchets. Ce sont donc des critères « techniques » .
Parties Prenantes industrielles	La mise en œuvre d’EcoDesign PILOT est bien adaptée dans une équipe de conception assistée d’un expert en environnement .
Parties Prenantes civiles	La mise en œuvre d’EcoDesign PILOT ne fait pas apparaître le point de vue privilégié d’une ou plusieurs parties prenantes civiles.
Remise en cause	EcoDesign PILOT est centré sur une amélioration ou une reconception de produit.
Processus d’éco-	EcoDesign PILOT a été créé pour apporter prioritairement une aide dans les phases de Diagnostic environnemental (en particulier pour déceler les points chauds et les hiérarchiser) et de Préconisation (sous forme de



3.4.1.1 Discussion sur l'étude descriptive

Couverture des dimensions et niveaux par les outils sélectionnés

Il ressort de cette première analyse que la très grande majorité des outils sélectionnés servent une vision en cycle de vie complet, laissant un espace de développement aux méthodes fondées sur des cycles de vie multiples. Les guides d'éco-conception sont confirmés dans aptitude à créer une vision transversale sur le processus d'éco-conception, abordant la plupart des activités hormis l'évaluation environnementale détaillée.

Actionnabilité du référentiel

Les champs qui apparaissent les plus simples à caractériser sont ceux que l'on trouve classiquement dans la littérature d'éco-conception, à savoir les étapes du cycle de vie. Les critères et les étapes du processus d'éco-conception correspondent à des « objectifs outils ».

Le niveau de remise en cause permis par l'outil peut être plus ambigu à déterminer, car le niveau systémique de problématisation n'est pas toujours accessible par de simples données bibliographiques.

Le point de vue des parties prenantes civiles est à la fois la plus original et la plus délicat à formaliser. Aucun point de vue de ce type n'est directement pris en compte dans les outils

d'ACV ou d'ACV simplifiée. De même la notion d'utilité pour des acteurs-cibles de la sphère industrielle mériterait d'être confrontée à un échantillon représentatif de ces acteurs.

3.4.2 Couverture thématique d'un cursus de formation

Dans ce paragraphe nous montrons comment le référentiel d'éco-conception peut être employé pour analyser le **degré de couverture thématique** d'un panel d'outils d'éco-conception. Nous supposons que cette couverture thématique doit être remplie à la fois:

- à un niveau global, par le nombre de dimensions abordées grâce au panel d'outils. Le critère associé se nomme CG (Couverture Globale) et est compris entre 0 et 1 (soit 6/6 dimensions);
- à un niveau détaillé, par le nombre de niveaux abordés pour chaque dimension. On définit CD (Couverture Détaillée) par la somme sur chaque dimension j des niveaux indépendants I_j abordés par le panel d'outils, ramenée au nombre total de niveaux N_j (ici au nombre de 23).

$$CD = \sum_{j=1}^6 I_j / N_j * 100$$

Pour exemple, nous faisons l'analyse de la « Boîte à Outils pour le Sustainable Design » associée au cursus de formation des designers industriels de l'Université de Loughborough (**Lofthouse, 2009**). Elle se compose de plusieurs outils qualitatifs et quantitatifs : outil radar EcoDesign Web, tableau d'évaluation Design Abacus, guide en ligne Information Inspiration, outil d'évaluation EcoIndicateur 99 et logiciel de matériaux du CES Edupack.

Pour le calcul de CD et CG (Tableau 10), on a fait apparaître le nombre de dimensions et de niveaux affectés à chaque outil (cf. ANNEXE 3). L'ensemble des 6 dimensions est couvert par le panel d'outils (CD=100%), chaque dimension étant abordée simultanément par plusieurs outils. De la même façon, chaque niveau peut être abordé simultanément par plusieurs outils. Le calcul de CD prend en compte la somme des niveaux indépendants, les doublons n'étant pas considérés. Pour la dimension Cycle de Vie, l'ensemble des outils

(hormis Information Inspiration) aborde le niveau « Cycle Complet ». CD vaut donc 1, correspondant au niveau unique « Cycle complet ». Finalement, la couverture détaillée CD de la « Boîte à outils pour le Sustainable Design » vaut 52% soit environ la moitié des niveaux recensés. Le manque de visibilité des parties prenantes civiles au travers des outils est l'une des principales lacunes que l'on peut relever.

Outil	Nombre de dimensions couvertes						Nombre de niveaux par dimension					
	CV	CR	PI	PC	RC	PR	CV	CR	PI	PC	RC	PR
EcoDesign Web	x	x			x		1	1	1	0	3	3
Design Abacus	x	x	x		x	x	1	1	1	0	2	2
Information Inspiration			x	x	x	x	0	0	1	1	2	2
Eco Indicateur 99	x	x	x		x	x	1	1	1	0	2	1
CES Edupack							1	1	1	0	2	1
	Dimensions couvertes						Nombre de niveaux indépendants/dimension					
Total	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	3	4
Couverture	CG=6/6=1						CD=12/23*100=52%					

CV: Cycle de Vie; CR: Critères; PI: Parties Prenantes Industrielles; PC: Parties Prenantes Civiles ;

RC: Niveau de Remise en Cause; PR: Gestion du Processus

Tableau 10: Couverture thématique de la «Boîte à outils pour le Sustainable Design»

3.5 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons explicité la construction de la méthode de recherche qui s'appuie sur une exploitation mixte de données empiriques qualitatives et quantitatives.

Nous avons ensuite présenté une étape préliminaire d'appropriation de la méthode de recherche en nous intéressant tout particulièrement aux outils d'éco-conception (cf. 2.3). Pour ce faire nous mettons à l'épreuve le référentiel proposé au 3.2. Nous montrons tout d'abord que les outils d'éco-conception existants peuvent être décrits à l'aide du référentiel. Dans la continuité nous évaluons le degré de couverture thématique d'un cursus de formation grâce à l'analyse du panel d'outils associés.

Les données qualitatives et quantitatives que nous exploitons sont issues d'un ensemble cohérent de quatre expérimentations formant un **maillage empirique** : BARBARAZ, LUMINAIRE, MOBILITE et ASPI. Chaque expérimentation contribue à illustrer une ou

plusieurs dimensions et niveaux du référentiel. Trois de ces quatre expérimentations sont détaillées dans le chapitre qui suit.

4. ETUDES EXPERIMENTALES

Ce chapitre est consacré à l'analyse et à la comparaison des deux principales études empiriques avec observation qui ont été menées dans le cadre de cette recherche. La première étude-pilote YAPO conduite avec des étudiants a permis de mettre au point la trame des études empiriques (**Vallet et al., 2009a ; 2009b**), mais ne sera pas reprise dans le manuscrit par volonté de concision. Après avoir explicité les modes de collecte et d'analyse des données choisis, nous présentons en détail le cas BARBARAZ avec des experts en éco-conception, puis l'expérimentation ASPI avec des novices. Le cas LUMINAIRE avec des experts est enfin brièvement exposé. Nous synthétisons les résultats des différentes expérimentations et apportons une validation à la proposition de référentiel d'éco-conception.

4.1 Collecte et analyse des données

4.1.1 Collecte des données

Deux principaux modes de collecte de données ont été mis en œuvre lors des études empiriques. Une collecte de données en temps réel est pratiquée par **observation participative** sur des groupes-échantillons de petite taille (4 à 6 groupes de concepteurs). Cela est complété par une approche **rétrospective** des diverses traces de l'activité. On utilise parallèlement les documents produits par les concepteurs (dessins, plans, fichiers numériques) et des retours ciblés par questionnaire.

4.1.2 Analyse des données

L'étude empirique BARBARAZ avec des experts a été réalisée en mars 2009 afin de servir de base solide à l'Etude Descriptive I. Pour acquérir une perception fine des bonnes pratiques de l'éco-conception et de l'utilisation collective des outils, nous avons procédé à une **analyse de protocole**⁵, c'est-à-dire à une analyse des transcriptions verbales des groupes de concepteurs

⁵ Cette approche est historiquement le premier mode d'analyse de sessions de conception. Elle a été développée à la fin des années 1980 (**Cross et al., 1996**).

(Gero & Mac Neill, 1998 ; Cross, et al. 1996). L'étude a été mise en œuvre à partir de la transcription des enregistrements audio des sessions, et fait intervenir une étape de codage.

Pour l'expérimentation ASPI de février 2011, l'analyse de protocole n'a pas été reconduite pour deux raisons. Premièrement, le passage de quatre groupes (BARBARAZ) à six groupes de travail (ASPI) aurait nécessité un temps d'analyse très élevé. A titre indicatif, **Ahmed et al. (2003)** font état d'environ 25 heures de transcription et d'analyse pour une heure d'enregistrement de données. Notre première expérience corrobore cet ordre de grandeur. Le temps d'analyse de BARBARAZ s'élève donc à environ 120h pour 4,5h d'enregistrement traité... Deuxièmement, les échanges entre des novices en éco-conception semblent insuffisamment denses pour justifier d'une transcription exhaustive. Nous choisissons donc dans ce dernier cas de faire une **analyse ciblée** des documents créés.

4.1.3 Systématisation de l'approche: livret expérimental

Chemin faisant, il est apparu nécessaire de formaliser plus systématiquement les montages empiriques. L'objectif est à la fois de garder une trace de la démarche et de pouvoir partager et critiquer les options prises avec d'autres chercheurs sur des bases clairement établies. Pour cela, nous avons résumé les objectifs et conditions de chaque étude empirique dans un livret expérimental scindé en trois volets inspiré de **Blessing & Chakrabarti (2009, p. 84)**: (1) cadrage; (2) structuration; (3) déroulement détaillé. Le livret «BARBARAZ» est fourni à titre d'illustration.

4.2 Le cas BARBARAZ

4.2.1 Cadrage de l'étude

L'objectif de cette étude expérimentale est d'explorer en détail le **processus d'éco-conception et ses activités** mis en oeuvre par des éco-concepteurs expérimentés sur un cas concret de reconception en phase préliminaire (Tableau 11).

Tableau 11: Cadrage de l'expérimentation BARBARAZ adapté de **Blessing & Chakrabarti (2009)**.

CADRAGE EXPERIMENTAL EXPERIMENTATION «BARBARAZ» Volet 1		Version: V1
		Date: 15/03/2009
Dimensions	Options choisies	
Objectif et question de recherche	Comment caractériser le processus d'éco-conception mis en oeuvre par des experts en conception préliminaire ?	
Nature de l'étude	Observation; Etude comparative (quatre outils d'éco-conception)	
Fondements théoriques	Mixte qualitatif et quantitatif; Adaptation du modèle de conception Process-Content (Stempfle & Badke-Schaub, 2002).	
Unité d'analyse	Processus d'éco-conception	
Variables	Indépendantes: outils d'éco-conception; Dépendantes: expertise environnementale	
Résultats attendus	Différences dans l'analyse et dans les solutions produites selon l'outil. Différences de perception des outils.	

Plusieurs hypothèses sont considérées à ce stade (Figure 37). La première étape consiste à se prononcer sur la nature du processus d'éco-conception. Nous désirons montrer que ce processus s'apparente à un processus de conception traditionnelle, comme l'ont fait **Sakao, Paulsson & Mizuyama (2011)** dans le cas du Product Service Systems (PSS). Cela s'opère par l'introduction d'un modèle en plusieurs étapes adapté issu de l'ingénierie de conception.

(B1) En conception préliminaire, le processus mis en œuvre par des éco-concepteurs expérimentés a les caractéristiques d'un processus de conception traditionnel.

En second lieu, nous souhaitons valider l'importance relative des activités d'éco-conception prédéfinies par le référentiel que nous proposons. Puis nous caractérisons plus finement le déroulement de certaines activités, dites «**éco-activités**» (stratégie environnementale, évaluation environnementale initiale et finale et recherche de solutions).

(B2) En conception préliminaire, le processus mis en œuvre par des éco-concepteurs expérimentés se compose d'éco-activités. La réalisation de ces éco-activités est conditionnée par l'objectif de l'outil d'éco-conception utilisé.

En troisième lieu, nous nous intéressons aux résultats créatifs du processus d'éco-conception. A cet effet, les éco-concepteurs expérimentés évaluent les concepts générés selon deux critères: la pertinence environnementale et l'originalité des idées.

(B3) En conception préliminaire, le processus mis en œuvre par des éco-concepteurs expérimentés conduit à des concepts pertinents au sens environnemental et créatif.

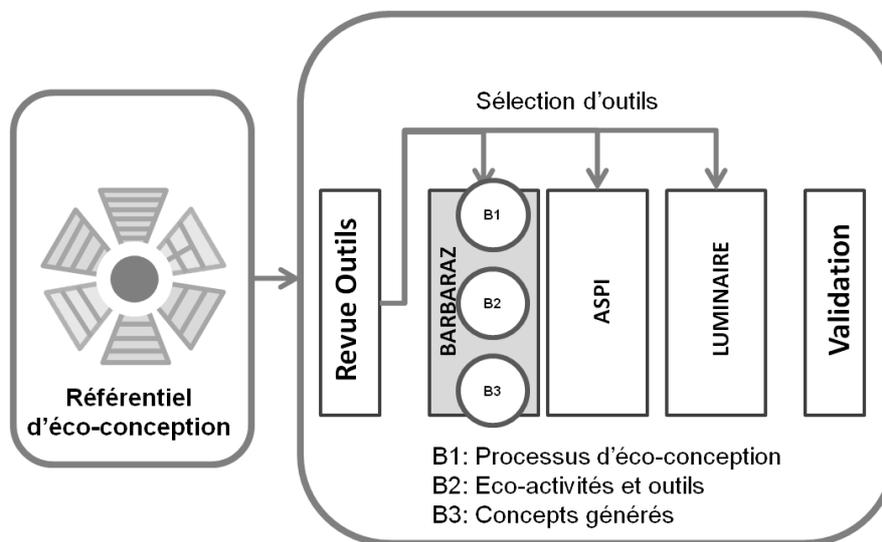


Figure 37: Hypothèses du cas BARBARAZ

4.2.1.1 Structuration de l'étude

Participants

Les sujets sont des membres participants du Réseau de Chercheurs en Eco-conception et Systèmes Durables (EcoSD). Ils appartiennent au milieu académique (75%) et industriel en tant que consultants en éco-conception (25%), et se trouvent mélangés dans les quatre groupes de test. L'expérience des sujets en éco-conception va d'un an à une quinzaine d'années, avec une moyenne de 6,30 années (écart-type 3,75). Bien que l'on puisse identifier trois catégories d'expertise chez les sujets allant de compétent à expert (**Eder, 2009**), nous utiliserons ici le terme générique d'«expert» pour désigner les éco-concepteurs impliqués dans cette expérimentation.

Cahier des Charges

Dans le Cahier des Charges sommaire illustré Figure 38, il est demandé aux participants de reconcevoir un **rasoir jetable**, qui appartient à la typologie des «produits à consommables». Du fait de la durée limitée de l'expérimentation (1h30), il paraît raisonnable de s'appuyer sur un produit de grande consommation, de faible complexité et ne nécessitant pas d'expertise particulière.

Le cas «Barbaraz»

«L'entreprise Barbaraz fabrique des **rasoirs mécaniques jetables** pour le marché européen. Souhaitant s'engager dans une démarche d'éco-conception à l'heure où les produits jetables sont fortement critiqués, cette société fait appel à vous, experts, pour analyser le produit de référence en terme d'impact environnemental, puis de lui faire des propositions concrètes d'amélioration suivant des niveaux progressifs.»



Bic Comfort 3

Figure 38: Extrait du Design Brief de reconception d'un rasoir jetable

La synthèse des options retenues pour structurer ce volet expérimental apparaît sur le Tableau 12.

Tableau 12: Structuration de l'expérimentation BARBARAZ, adapté de **Blessing & Chakrabarti (2009)**.

STRUCTURATION		Version: V1
EXPERIMENTATION «BARBARAZ» -Volet 1		Date: 15/03/2009
Dimensions		Options choisies
Processus	Observation processus	Point de départ : informations produit et marketing, présentation des outils disponibles Livrables: libre (texte, schémas, fichiers).
	Mise en place	Laboratoire: salle de réunion, avec équipement audio mobile.
Acteurs	Participants	23 professionnels académiques et industriels, experts en en éco-conception.
	Rôle du chercheur	Observation participative
Cahier des charges	Tâche	Reconception d'un rasoir jetable; Cahier des Charges: réaliste.

4.2.2 Déroulement détaillé

L'expérimentation se déroule en deux temps (Figure 39): présentation collective du cas et des outils testés, puis test dans les quatre groupes le jour J; recueil de la perception des participants sur la manipulation des outils par un questionnaire Q1 (J+7); évaluation des concepts générés par les groupes par un questionnaire web Q2 (J+30).

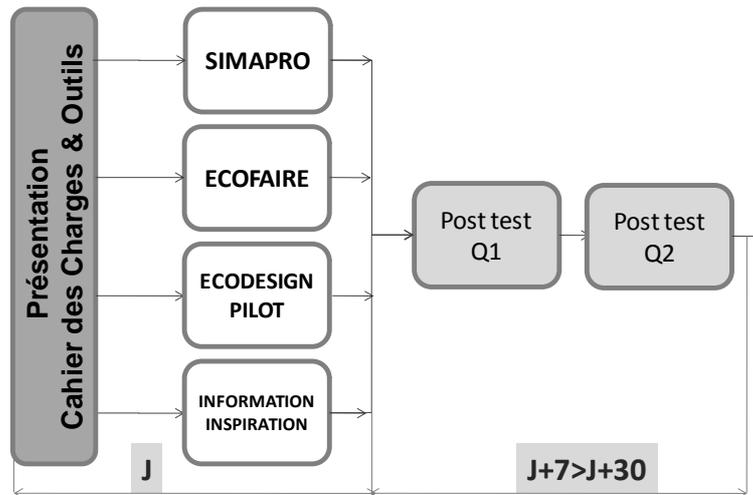


Figure 39: Déroulement de l'expérimentation BARBARAZ

4.2.2.1 Choix des outils testés

L'expérimentation a été conduite avec quatre outils d'éco-conception attribués aux différents groupes: les guides ECOFAIRE, ECODESIGN PILOT et INFORMATION INSPIRATION, ainsi que l'outil d'ACV SIMAPRO. L'enregistrement audio du groupe INFORMATION INSPIRATION étant partiellement utilisable, le travail de ce groupe n'a pas pu être pris en considération pour le travail de codage. Les trois premiers outils sont des guides génériques d'éco-conception (2.3.3.3). La présence de SIMAPRO parmi ces trois guides se justifie car il fait figure de référence chez les praticiens de l'éco-conception. Il s'agit par ailleurs d'observer la capacité qu'ont les éco-concepteurs expérimentés à utiliser un outil d'ACV en phase amont de la conception, alors que très peu d'informations sont mises à leur disposition.

4.2.2.2 Modèle et schéma de codage

Les trois sessions étudiées ont été transcrites suivant la notation simplifiée proposée par **Mc Donnell & Lloyd (2009, p.7)**. Le découpage par ligne correspond à une intention du concepteur identifiée par le codeur. Ce découpage a été affiné au cours de la démarche de codage. La synthèse des conditions d'observation des trois groupes apparaît sur le Tableau 13.

Tableau 13: Synthèse de l'observation des trois sessions d'éco-conception

Groupes	Durée de l'observation	Nombre de lignes transcrites
SIMAPRO	1h 20	182
ECOFAIRE	1h24	550
ECODESIGN PILOT	1h27	537

Puisqu'il s'agit d'analyser une session collective d'éco-conception, le modèle de codage choisi doit à la fois tenir compte de la dimension de collaboration entre les éco-concepteurs, et des particularités de cette activité, dont on a vu qu'elle comportait plusieurs étapes dédiées (2.3.3.3). Nous retenons les trois modèles présentés sur le Tableau 14. Le modèle de codage de Bakker convient partiellement, mais doit être complété car il a été créé pour analyser des sessions individuelles d'éco-conception (**Bakker, 1995**). Le second modèle de **Stemfle & Badke-Schaub (2002)** de conception traditionnelle est inspiré des étapes de référence du développement de produit (**Pahl et al., 2007 ; Ulrich & Eppinger, 2011**). Il présente l'intérêt de rendre compte des phases de résolution de la tâche elle-même (sous l'appellation «Contenu»), ainsi que des étapes d'organisation du travail spécifique de l'activité en équipe (sous le terme «Processus»). Le troisième modèle de conception est construit d'après les différents modes d'interactions entre les membres d'une équipe de conception (**Prudhomme, Pourroy & Lund, 2007**). Ce dernier nous aide à clarifier la définition de la catégorie «Evaluation des solutions», qui regroupe les phases d'analyse et d'évaluation. Le schéma de codage que nous proposons est finalement issu d'un métissage entre les travaux de **Bakker (1995)** et de **Stemfle & Badke-Schaub (2002)**. Le schéma de codage est complété par une catégorie «Outil» afin d'identifier les moments où il est spécifiquement fait référence à l'outil d'éco-conception utilisé par le groupe.

Tableau 14: Proposition d'un modèle collectif d'activité en éco-conception

(Bakker, 1995)	(Stemfle&Badke-Schaub, 2002)		(Prudhomme, Pourroy&Lund, 2007)	Notre proposition	
Other	Content	Process		Contenu (C)	Processus (P)
Analysis	Goal clarification	Planning	Outside activity	Définition des Objectifs (G)	Planning (P)
Environmental Analysis	Solution Generation		Social relation	Evaluation Initiale (EI)	Analyse(A)
Idea Generation	Analysis	Analysis	Interaction management	Stratégie Environnementale (St)	
Evaluation	Evaluation	Evaluation	Task management	Génération de Solutions (So)	
Environmental Evaluation	Decision	Decision	Opinions	Evaluation de Solutions (ES)	Evaluation (E)
Modification	Control	Control	Argumentations	Décision (D)	Décision (D)
			Explore and Deepen arguments	Contrôle (C)	Contrôle (C)
				Autre (O)	Autre (O)

Le codage a été effectué itérativement par deux chercheurs. Afin d'en tester la robustesse et de préciser le modèle, deux sessions communes de codage d'une cinquantaine de ligne ont été pratiquées. A l'issue de cette phase de mise au point et d'apprentissage pour les codeurs, il est a été effectué un double codage des sessions SIMAPRO, ECOFAIRE et ECODESIGN PILOT, pour lesquels les coefficients Kappa (Cohen, 1960) obtenus sont respectivement de 0.93, 0.80 et 0.83. Ces résultats étant supérieurs à 0.6, le schéma de codage est jugé suffisamment robuste. Le schéma de codage dans sa version finale est documenté en ANNEXE 5. Pour décrire de façon détaillée l'évaluation environnementale initiale jugée cruciale dans le processus, nous avons procédé à une deuxième étape de codage de la catégorie Contenu (C)/Evaluation Initiale (EI). Concernant la phase d'usage, trois sous-catégories concernant les conditions de rasage (CD), la fonctionnalité du rasage (UF), et les consommations et impacts générés par le rasage (CO) ont été créées. Nous y ajoutons les catégories classiques liées au cycle de vie (hors phase d'usage): extraction de matériaux (M), fabrication (FA), distribution et logistique (T) et fin de vie (FV). Le double codage des sessions SIMAPRO, ECOFAIRE et ECODESIGN PILOT à ce niveau conduit à des

coefficients Kappa respectifs de 0.86, 0.76 et 0.92, ce qui est de nouveau considéré comme très satisfaisant. Un extrait du texte transcrit et codé pour le groupe ECODESIGN PILOT figure ci-dessous (Tableau 15).

Tableau 15: Extrait de codage de la session ECODESIGN PILOT

Ligne	Temps	Part.	Codage			Dialogue
			P	C		
234		TL	P	C		Résumé, utilisation très important et fin de vie, 2ème truc, non ?
235		TL	C	St		Fin de vie, extraction. Oui, plus fin de vie.
236		F	C	EI	FA	Après faut voir parce que la mousse fait appel à des procédés pas terribles. C'est rejeté dans l'eau, ce qu'il y a comme produit dedans.
237		J	C	G		REACH va passer par là.
238		F	P	O		Utilisez du savon.
239	37'	TL	C	St		Donc là extraction fin de vie parce qu'il y a pas de raison.
240		F	C	So		Donc il faudrait inventer un rasoir qui n'ait pas besoin ni d'eau ni de mousse.
241		TL	P	P		Je regarde ce qu'ils mettent (<i>Lit rapidement</i>). "Machine à laver à usage intensif".
242		TL	P	A		On n'est pas vraiment dans le cas de la machine à laver. Là l'exemple type D, à usage intensif. Le type C, le produit-

Part. : Participant ; TL : Animateur ; F : Fanny ; J : Jonathan

La synthèse des options retenues pour structurer ce volet expérimental apparaît sur le Tableau 16.

Tableau 16: Détail de l'expérimentation BARBARAZ adapté de **Blessing et Chakrabarti (2009)**.

DESCRIPTION DETAILLEE EXPERIMENTATION «BARBARAZ» - Volet 1		Version: V1
		Date:15/03/2009
Dimensions		Options choisies
Cas	Nombre de cas	1 groupe avec outil INFORMATION/INFORMATION INSPIRATION; 1 groupe avec outil SIMAPRO ; 1 groupe avec outil ECODESIGN PILOT ; 1 groupe avec outil ECOFAIRE.
	Taille	4 à 5 personnes par groupe

Données	Méthode de collecte	Observation directe; Analyse de documents-traces; Questionnaires de perception outil et d'évaluation de solutions
	Codage et analyse	Analyse qualitative: perception des outils. Analyse quantitative: transcription et codage des sessions, évaluation des solutions.
	Vérification	Confrontation bibliographique.
Gestion temporelle	Continuité	Tâche réalisée en une fois, en continu.
	Durée	30 minutes de mise en situation et 1h30 de test. Questionnaire Q1 par mail (J+7); questionnaire web Q2 (J+30).

4.2.3 Résultats

4.2.3.1 Aperçu global du processus d'éco-conception

Au premier niveau, nous comparons les pourcentages du temps consacrés aux activités génériques « Contenu » et « Processus » pour chaque groupe (

Figure 40). Il est notable que la proportion du temps consacré à la gestion du processus (Processus) est peu variable d'un groupe à l'autre, oscillant de 23% du temps pour SIMAPRO à 33% pour ECODESIGN PILOT. Ce rapport Processus/Contenu de $\frac{1}{4}$ à $\frac{1}{3}$ n'est pas sans rappeler l'observation faite par **Stemfle & Badke-Schaub (2002)**, faisant état d'une proportion récurrente de $\frac{1}{3}$ Processus et $\frac{2}{3}$ Contenu en conception traditionnelle.

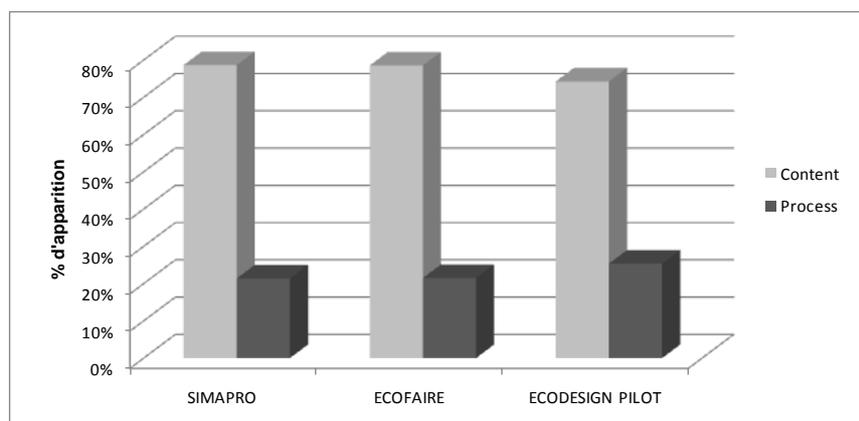
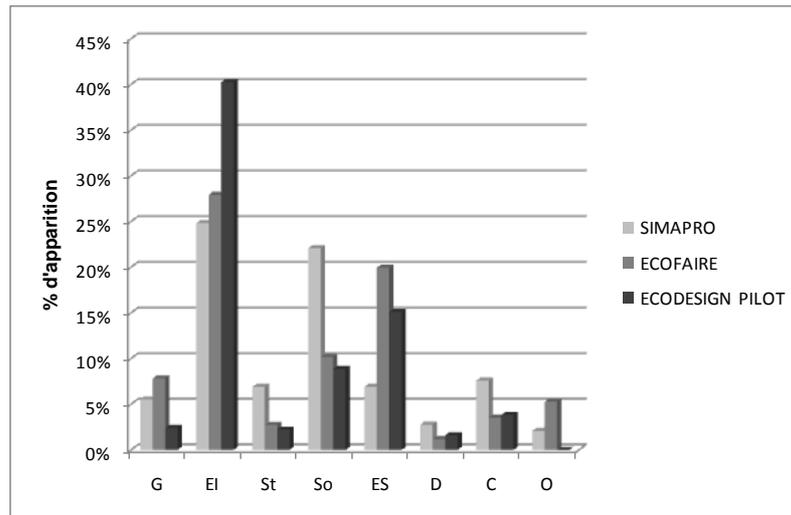


Figure 40: Répartition temporelle globale des phases «Contenu» et «Processus»

Au second niveau, on traduit la répartition temporelle des huit sous-activités « Contenu » (Figure 41). La répartition des activités «Processus» n'est pas reproduite ici, notre analyse étant focalisée sur la réalisation de la tâche d'éco-conception et non sur son mode de gestion par les groupes. Le pourcentage de verbalisations qui n'ont pas pu être catégorisées (car tronquées) est de 6, 3 et 7% pour SIMAPRO, ECOFAIRE et ECODESIGN PILOT respectivement.



G : Ojectifs ; EI : Evaluation Initiale ; St : Stratégie ; So : Solutions ; ES : Evaluation de solutions ; D ; Décision ; C : Contrôle; O : Autre

Figure 41 : Répartition temporelle des activités « Contenu »

En ce qui concerne le travail sur le contenu (Figure 41) peu de décisions semblent être prises dans l'ensemble des groupes (moins de 3%). Une part plus importante de discussions informelles et de relations sociales est observée dans le groupe ECOFAIRE. En second lieu, il apparaît des différences manifestes dans la gestion des cinq premières sous-catégories: Goal (G), Evaluation Initiale (EI), Stratégie (St), Solutions (So) et Evaluation de Solutions (ES). On remarque que les concepteurs du groupe ECODESIGN PILOT consacrent 40% de leur temps à faire l'évaluation environnementale initiale du produit, soit respectivement 37,5% et 30% de temps de plus que les groupes SIMAPRO et ECOFAIRE. Le groupe SIMAPRO passe deux fois plus de temps à la recherche de solutions que les autres. Notons que cela reflète, d'après notre codage, une recherche de solutions à deux niveaux: des concepts élémentaires de produits (par exemple « manche en bambou »), mais aussi des formulations intermédiaires relatives comme « Raccourcir le manche de moitié », qui ont été classées dans la rubrique So. Sous l'influence des questions du guide, l'équipe ECOFAIRE s'attache davantage que les

autres groupes à discuter les objectifs et le cadrage du projet, jusqu'à questionner la nécessité sociale du rasage: «*Ceci dit, est-ce que c'est un effet de mode, un effet social, une problématique sociale?* » (Ligne 500). Il est consacré plus de temps à l'évaluation qualitative des solutions avec ECOFAIRE (+10% par rapport à SIMAPRO; +5% par rapport à ECODESIGN PILOT).

Au delà de ces différences, nous remarquons une constance de la proportion des phases de définition du problème [G, EI, St] et de définition des solutions [So, ES, D, C]. En effet, les trois groupes consacrent en moyenne 40% du temps aux activités [G, EI, St] (SIMAPRO: 37%; ECOFAIRE: 38% ; ECODESIGN PILOT: 45%), et 34% aux activités [So, ES, D, C] (SIMAPRO: 39% ; ECOFAIRE: 35% ; ECODESIGN PILOT: 29%). Les activités orientées «problème» et «solutions» ainsi définies apparaissent donc en équilibre temporel quelque soit l'outil utilisé.

4.2.3.2 Utilisation effective des outils

Avant toute analyse de détail, il est opportun de s'intéresser aux périodes d'usage effectif des outils au cours du test. Deux cas de figures se présentent. ECOFAIRE est utilisé régulièrement tout au long de la session. A contrario, ECODESIGN PILOT et SIMAPRO ne sont intégrés que dans une seconde phase de travail, après 43% et 70% du temps passé (respectivement). Le tableau comparatif des occurrences ci-dessous fournit un aperçu de la contribution réelle de l'outil par type de sous-activité (Tableau 17). La distinction n'apparaît pas pour ECOFAIRE. Lorsqu'un faible écart est observable entre les pourcentages «Global» (i.e. sur l'ensemble de la session) et «Avec outil», cela signifie que l'outil a une influence prépondérante sur la réalisation de la sous-activité. Trois sous-activités sont très peu, ou pas du tout, supportées par les outils SIMAPRO et ECODESIGN PILOT: Définition des objectifs (G); Evaluation initiale (EI) et Définition de stratégie (St). La nature de ces deux dernières périodes de réflexion fait l'objet des paragraphes qui suivent.

Tableau 17 : Contribution de l'outil par sous-activité

Occurrence de contenu (%)	Outil				
	SIMAPRO		ECOFAIRE	ECODESIGN PILOT	
	Global	Avec outil	Global	Global	Avec outil
G	5.5	0	7.6	2.4	0
EI	24.8	0	28.0	40	6
St	6.8	0	2.8	2.2	0.8
So	22	4	10.0	8.8	8.6
ES	6.8	5.5	20.0	15	15
D	2.7	2.7	1.1	1.6	0.2
C	7.5	5.5	3.5	3.8	0.2
O	2	0	5.2		0

Légende

zone de dominance de l'outil

4.2.3.3 Evaluation environnementale initiale du produit

Grâce à un codage de troisième niveau, il est possible de comprendre le cheminement des éco-concepteurs experts pour aborder l'évaluation environnementale initiale du produit. Nous relevons deux éléments caractéristiques :

- Une alternance entre des périodes d'évaluation qualitative et quantitative,
- Des visions environnementales et fonctionnelles imbriquées et indissociables, donnant à l'évaluation initiale un caractère «éco-fonctionnel».

Pour appuyer cette dernière remarque, des répétitions de séquences sont recherchées dans cette phase. On cherche à voir si certaines associations de raisonnement sont privilégiées par les éco-concepteurs expérimentés parmi les catégories Conditions de rasage (CD), Fonction (UF), Consommation (CO), Matériaux (M), Production (FA), Distribution (T) et Fin de Vie (FV). Une *séquence* est déterminée par une succession d'au moins deux interventions codées dans la rubrique Evaluation Initiale (EI). Deux séquences sont séparées par une intervention de nature différente, par exemple Contenu-Contrôle ou Contenu-Décision. Les séquences

remarquons que trois des quatre catégories représentées font intervenir un échange sur les conditions de rasage CD. D'une façon globale sur l'ensemble des sessions, la combinaison CO+CD seule ou combinée apparaît 12 fois, ce qui représente environ $\frac{1}{4}$ de l'ensemble des motifs. Cela signifie que les experts accordent de l'importance à une définition itérative et conjointe des conditions de rasage et des consommations d'eau et de mousse associées. En seconde position et dans les mêmes proportions, nous trouvons les échanges sur la caractérisation CV des phases de vie du produit (hors usage) et des interdépendances entre ces phases. Il s'agit par exemple d'examiner l'influence d'un choix de matériau (par exemple le polystyrène) et d'un mode de fabrication (par exemple l'injection) sur l'option de fin de vie du produit (ici la mise en décharge).

4.2.3.4 Stratégie environnementale

Les éléments de stratégie environnementale sont dénommés «leviers» au sein du groupe SIMAPRO et «axes» pour le groupe ECOFAIRE. Ces stratégies sont déclinées par les équipes dans le contexte du rasage (Tableau 19). Après avoir été extrait des transcriptions, chaque énoncé est repositionné par rapport aux stratégies de **Brezet & Van Hemel (1997)**. L'énoncé de ces stratégies constitue une étape charnière du processus ainsi qu'une base pour la recherche créative de solutions. Trois stratégies principales de réduction d'impacts sont évoquées pour ce produit.

- La stratégie de **réduction d'eau et de consommable** (mousse ou savon) est exprimée par les groupes ECODESIGN PILOT et SIMAPRO. Curieusement, cela n'apparaît pas explicitement dans le groupe ECOFAIRE.
- La stratégie la plus évidente de **réduction et de gestion des matières premières** apparaît dans les trois groupes. Cependant le groupe ECODESIGN PILOT n'applique pas cette stratégie pour sa recherche de solutions, contrairement aux deux autres groupes.
- La stratégie d'**influence sur le comportement des utilisateurs** et de recherche de durabilité est également abordée dans les trois groupes. Deux idées centrales sont évoquées: indiquer la consommation d'eau pour sensibiliser l'utilisateur et favoriser l'évacuation des poils coupés pour augmenter la durée de vie du produit. ECOFAIRE

est le seul groupe à proposer l'ajout d'une fonction supplémentaire (brosse à dents) pour rendre plus efficiente la présence du manche. En parallèle, les participants s'interrogent activement et de façon réflexive sur l'acceptabilité et la praticité de ce choix de conception, ainsi que sur la légitimité du concepteur à avoir une influence réelle sur les comportements des usagers (Lilley, 2009).

En conclusion, cette étape de simplification et de hiérarchisation des problèmes environnementaux causés par le rasage est abordée de façon homogène dans les trois groupes.

Outil	Enoncé de stratégie (Brezet & Van Hemel, 1997)	Low impact material	Material use	Production techniques	Distribution system	Impact use	Lifetime	End of Life
SIMAPRO	Limiter la quantité de matière du rasoir		x					
	Diminuer l'eau et la mousse		x			x		
	Evacuer eau et poils coupés						x	
ECOFAIRE	Choisir un monomatériau		x					x
	Ajouter une fonction					x	x	
	Supprimer le manche		x					
ECODESIGN PILOT	Réduire la consommation d'eau					x		
	Comportements utilisateurs					x	x	
	Minimiser : sachet, bombe, eau		x			x		
	Indiquer la consommation d'eau					x		

Tableau 19: Déclinaison des stratégies environnementales dans le cas du rasage

4.2.3.5 Recherche et évaluation environnementale de solutions

- Présentation des concepts

La plupart des résultats de la phase de génération d'idées ont été formulés par écrit ou sous forme de croquis. Certaines idées ont simplement été évoquées oralement. L'intégralité des concepts apparaît sur le

Tableau 20, et quelques exemples en sont extraits (Figure 43). L'examen de ces résultats nous conduit à deux remarques.

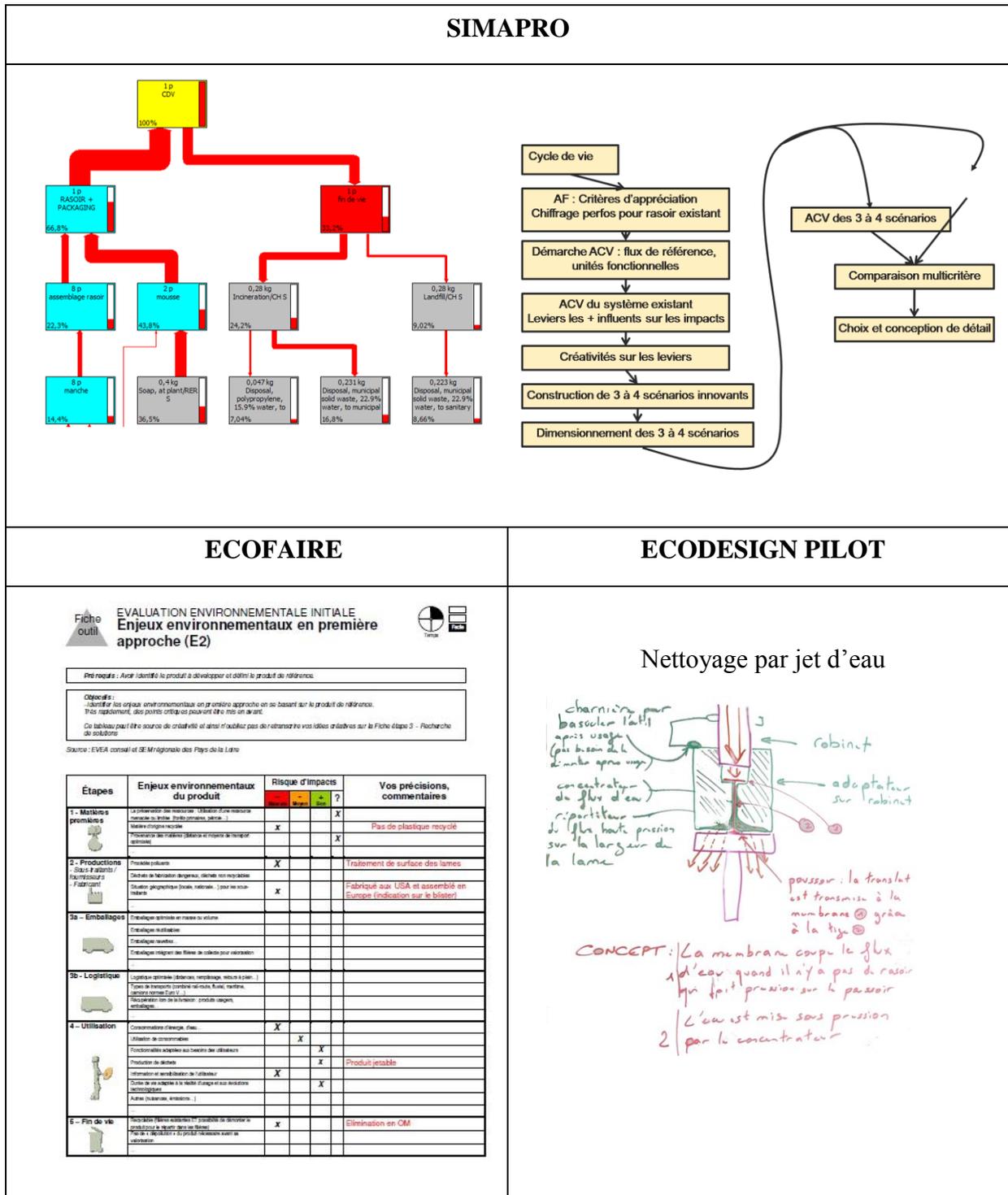
La production créative de groupe SIMAPRO se différencie de celle des autres groupes. L'équipe génère des idées, met en forme la démarche pour aboutir à ces idées et réalise enfin leur évaluation comparative à l'aide de trois scénarios. Un scénario consiste par exemple à diminuer le manche de moitié, les autres paramètres restants inchangés. Les idées des trois groupes ne paraissent pas toutes correspondre à un même périmètre de remise en cause du produit. A un niveau minimal d'amélioration sont évoqués un changement de matière (bambou) ou une réduction de la quantité (manche raccourci de moitié). A un niveau de reconception du produit, on constate que les éco-concepteurs ajoutent une ou plusieurs fonctionnalités au rasoir (manche multi-usage ou nettoyage des poils par soufflage). L'innovation produit apparaît lorsqu'il s'agit d'associer au rasoir l'usage d'une bonde pour indiquer la consommation d'eau et la température idéale de rasage. En revanche l'innovation système n'est pas abordée dans les exemples cités.

La quasi-totalité des idées a été évaluée a posteriori par l'ensemble des participants. Les principales conclusions de cette activité sont les suivantes.

Tableau 20: Concepts de rasoirs jetables générés par les trois groupes

N° idée	SIMAPRO	ECOFAIRE	ECODESIGN PILOT*
1	Manche court	Manche monomatériau recyclable	Rasoir avec buse
2	Manche en bambou	Tête séparable	Nettoyage par pression manuelle
3	3 lames de rechange	Manche multi-usage (brosse à dents/rasoir)	Poussée des poils
4	Lames affutables	Marquage des matériaux	Nettoyage par jet d'eau (sous le robinet)
5	Lames à deux faces coupantes	Matériau biodégradable	<i>Lames écartées</i>
6	Lame large et flexible	Couleurs à base de pigments végétaux	<i>Lames vibrantes</i>
7	Applicateur de mousse intégré	Système de nettoyage : élimination des poils	<i>Indication de température par changement de couleur</i>
8	Mousse solide	Informations usager	<i>Indication consommation d'eau: changement de raideur du rasoir</i>
9	Racleur sur le manche		<i>Indication de consommation d'eau: bipper</i>
10			<i>Une bonde avec jauge (eau et température)</i>

*En italique, les idées du groupe ECODESIGN PILOT n'ayant pu être évaluées au cours de Q2.



- Evaluation finale des performances des concepts

Par «concept», il est entendu une idée élémentaire d'amélioration. Parmi les critères génériques souvent cités pour qualifier des résultats créatifs sont retenus l'originalité, et la performance environnementale (**Jones et al., 2001**). Trois critères complémentaires peuvent être envisagés en complément (1) la fluidité (« fluency »), recouvrant le nombre d'idées produites; (2) la flexibilité (« flexibility ») pour décrire le champ couvert par l'ensemble des idées; (3) le niveau de détail des idées (« elaboration ») (**Kim et al., 2009**). Lorsqu'il est demandé aux experts de donner un avis sur la performance environnementale, on s'attend à ce qu'ils se prononcent sur l'intensité de réduction potentielle d'impact environnemental, ou encore sur le caractère respectueux de l'environnement de l'idée. Une échelle de Likert de 1 à 5 est utilisée à cet effet. Un note de 1 signifie «Pas du tout performant au sens environnemental» alors qu'une note de 5 veut dire «Très performant au sens environnemental». Les notes moyennes présentées dans ce paragraphe ont été extraites du questionnaire Q2 (taux de réponse 56%) (ANNEXE 6). Les notes moyennes données par les experts aux divers concepts sont résumées sur un graphe à deux dimensions (Figure 44). La performance environnementale des concepts se situe sur l'intervalle [2,67; 3,45] (moyenne 2.98), tandis que l'originalité couvre l'intervalle [2,36; 4,27] (moyenne 3,12).

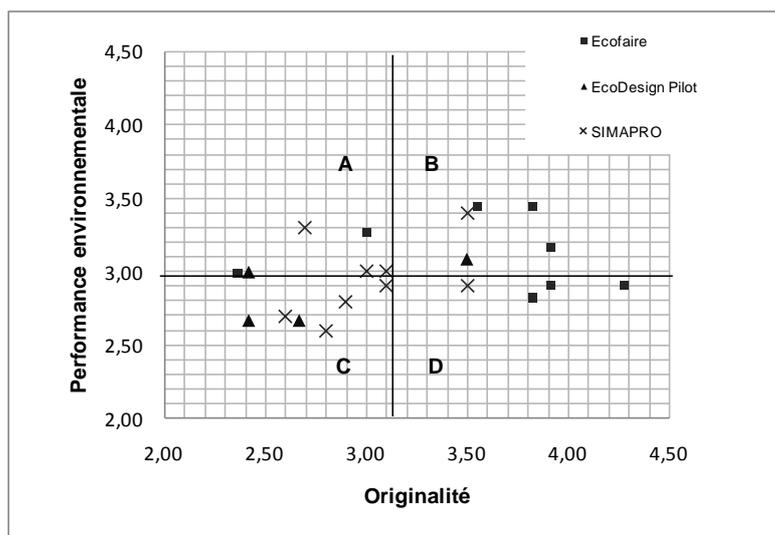


Figure 44: Notes moyennes données par les experts aux concepts

4.2.4 Discussion des résultats de l'expérimentation BARBARAZ

4.2.4.1 Nature du processus d'éco-conception (B1)

Selon (B1), **«En conception préliminaire, le processus mis en œuvre par des éco-concepteurs expérimentés a les caractéristiques d'un processus de conception traditionnel»**. Cette hypothèse se vérifie au cours de l'expérimentation. Le modèle de codage issu de la conception traditionnelle se révèle adapté à la description de l'activité des groupes. Celle-ci se découpe en une phase de gestion du processus collectif (mise en place de la démarche de travail, questions sur les outils) et une phase de réalisation du travail de reconception. Lors de cette phase et après cadrage, nous retrouvons une alternance de génération d'idées et d'évaluation (du produit initial et des idées d'amélioration). S'y ajoute la définition d'une stratégie tournée vers l'environnement, cohérente avec la mise en œuvre de stratégies de résolution en conception **(Ahmed et al., 2003)**.

4.2.4.2 Caractérisation du processus par les outils (B2)

Selon B2, **«En conception préliminaire, le processus mis en œuvre par des éco-concepteurs expérimentés se compose d'éco-activités. La réalisation de ces éco-activités est conditionnée par l'objectif de l'outil d'éco-conception utilisé»**. Cette hypothèse n'est pas vérifiée dans la limite de nos observations. Nous constatons qu'à l'exception d'ECOFAIRE, les experts ne mettent en œuvre l'outil qu'après environ 1/3 et 2/3 du temps total pour ECODESIGN PILOT et SIMAPRO respectivement. Notre interprétation en est que c'est l'expertise des participants, et non l'outil, qui guide les premières phases de travail. La première activité non supportée par l'outil est l'évaluation initiale, dont on a vu qu'elle mêlait itérativement des considérations fonctionnelles et environnementales: scénarisation du rasage pour homme ou femme, consommations d'eau et de mousse associées. La seconde activité consiste en la définition d'une stratégie environnementale adaptée au produit, réalisée de façon homogène par les trois groupes. Nous en déduisons une nouvelle hypothèse: «Les activités d'évaluation initiale et de recherche de stratégie environnementales sont caractéristiques de l'expertise environnementale en conception préliminaire».

4.2.4.3 Caractérisation de la recherche créative (B3)

Nous ne vérifions pas intégralement (B3): «**En conception préliminaire, le processus mis en œuvre par des éco-concepteurs expérimentés conduit à des concepts pertinents au sens environnemental et créatif**». Les concepts émis par les experts sont d'un niveau de détail très variable. Si l'évaluation de l'originalité par les experts eux-mêmes semble faire consensus, il n'en va pas de même pour la performance environnementale. Le système de notation de 1 à 5 ne paraît pas adapté, n'étant pas lié à des critères environnementaux explicites et partagés par les experts.

4.2.5 Limites de l'expérimentation BARBARAZ

Nous mettons en évidence plusieurs limites à cette expérimentation, et discutons leur influence sur les résultats obtenus dans ce qui suit.

Limite de la construction expérimentale. La principale limite de ce travail est l'absence d'un groupe de contrôle, qui aurait effectué la même tâche que les autres sans l'aide d'aucun outil. Cela nous aurait permis de consolider les caractéristiques de l'expertise environnementale. Cette lacune est comblée dans l'expérimentation ASPI qui suit.

Limites de l'évaluation des concepts. On note une difficulté des participants à juger de certains concepts (notamment ceux générés par les autres groupes) au travers du questionnaire web. Le manque de détails et d'homogénéité dans la présentation des idées peut en être la cause. Comme **Tyl (2011)**, nous remarquons une disparité au niveau de la perception de la performance environnementale des concepts entre les évaluateurs, contrairement à l'originalité, perçue de manière plus homogène. Ceci constitue une limite supplémentaire, ce qui nous engage à considérer un second volet à l'expérimentation. Les volets 2 de BARBARAZ et LUMINAIRE, testés en juin 2011, sont actuellement en cours d'exploitation et devraient faire l'objet de prochaines communications.

Limite de la transcription verbale. Les activités silencieuses comme le calcul ou la modélisation qui s'opèrent dans le groupe SIMAPRO se traduisent par un vide d'expression, puisque l'on comptabilise ici moins de la moitié d'échanges par rapport aux deux autres

équipes (soit 182 lignes contre 537 et 530 lignes). La comparabilité entre groupes est certes affectée. Dans le même temps, on peut émettre l'hypothèse (et cela resterait à vérifier) que ce type d'outil favorise peu les échanges verbaux.

4.3 Le cas ASPI

La démarche de construction et les résultats du cas ASPI présenté ci-ont été communiqués dans **Vallet, Millet & Eynard (2011b ; 2012)**.

4.3.1 Cadrage de l'étude

Le cas ASPI avec des d'étudiants novices en éco-conception fait suite au cas BARBARAZ, au cours duquel nous avons validé un modèle de processus d'éco-conception (Figure 45). Le modèle que l'on considère validé constitue l'un des points d'entrée du cas. Nous proposons deux hypothèses A1 et A2. A1 est une prolongation par la négative de la conclusion apportée à B2 dans le cas BARBARAZ, d'après laquelle «Les activités d'évaluation initiale et de recherche de stratégie environnementale sont caractéristiques de l'expertise environnementale en conception préliminaire ».

(A1) «Les activités d'évaluation initiale et de recherche de stratégie environnementales ne sont pas caractéristiques d'une pratique environnementale de concepteurs novices en conception préliminaire.»

Grâce à A2, nous cherchons à caractériser de façon comparative le processus d'éco-conception entre approche en cycle de vie et approche par les parties prenantes. L'état de l'art a mis en évidence la nécessité de prendre en considération les parties prenantes dans le processus d'éco-conception. Cependant peu d'études de terrain s'attachent à cette question, qui nous semble importante en formation.

(A2) «Les éco-activités du processus d'éco-conception mises en œuvre par des concepteurs novices sont influencées par l'introduction de la notion de Parties Prenantes.»

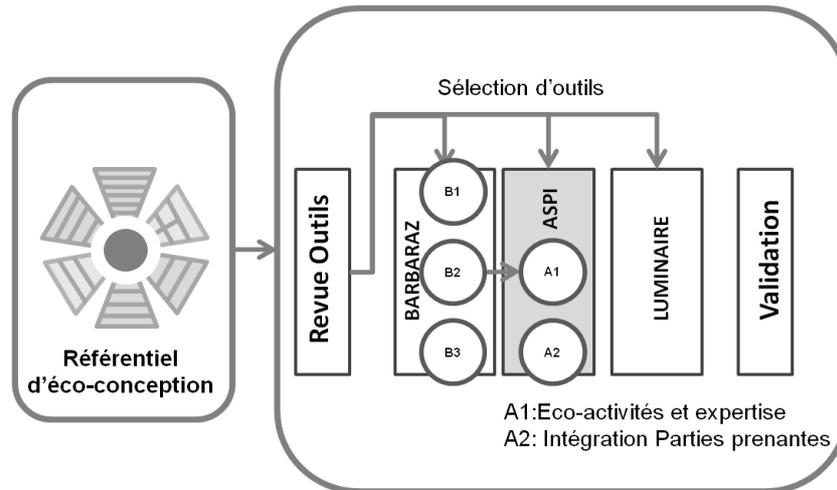


Figure 45: Hypothèses du cas ASPI

L'ensemble de données structurées fournies aux étudiants comprend:

- des informations environnementales sur un produit existant (résumé du texte préparatoire EuP relatifs aux aspirateurs (**AEA, 2009**), retour d'expérience du fabricant Rowenta sur l'aspirateur Shock Absorber (**CCI St Etienne & IDP Montréal, 2009**). Le choix de ce type d'informations de niveau de complexité intermédiaire a été largement influencé par les conclusions de **Collado-Ruiz & Ostad-Ahmad-Ghorabi (2010)**).
- un processus d'éco-conception découpé au préalable en 4 étapes distinctes, issu du cas BARBARAZ: Cadrage, Evaluation environnementale initiale; Définition d'une stratégie environnementale; Recherche de solutions et première évaluation qualitative des solutions.

Deux points de vue comparés sont introduits dans cette expérimentation. Le premier est un point de vue classique fondé sur le cycle de vie du produit. Le second est centré sur les parties prenantes (ou «stakeholders»).

4.3.2 Structuration de l'étude

Participants

Pour cette expérimentation, 24 étudiants européens ont été mis à contribution dans le cadre de l'école d'hiver 2011 du programme ECIU (European Consortium of Innovative Universities), dont le thème était l'éco-conception. La moitié des étudiants suivent le cursus ingénieur en mécanique de l'UTC, université d'accueil pour l'occasion. Le reste du groupe est formé de 7 étudiants en management de Strathclyde-UK, deux étudiants de Tallinn-Estonie et enfin de deux étudiants de Twente-Netherlands. Le groupe a une bonne mixité, étant composé de 10 filles et 14 garçons. La grande majorité des étudiants n'a aucune connaissance en éco-conception (19/24, soit 79%). Quatre étudiants déclarent avoir quelques notions. Une seule étudiante a déjà participé à un cours et à un projet en éco-conception et Analyse de Cycle de Vie. Bien qu'il eût fallu, en théorie, écarter de l'expérimentation cette personne non débutante, cela n'a pas pu être fait dans le contexte de l'école d'hiver. Pour les mêmes raisons de bonne marche du programme, nous avons fait le choix de mêler les étudiants locaux et les extérieurs au cœur des groupes, provoquant un brassage des formations initiales d'ingénierie et de management.

Design Brief

L'activité de reconception concerne un **aspirateur-traîneau**, produit de grande consommation de complexité moyenne comprenant une centaine de pièces. Bien que fictif, le cahier des charges de l'étude est rédigé sous la forme d'une demande réaliste d'une entreprise d'électro-ménager européenne. Plusieurs études publiées sur les questions environnementales associées à l'aspiration des poussières constituent une base documentaire pour notre étude (**Abele et al., 2005 ; Sauer et al., 2004**).

Rôle du chercheur

Le chercheur doit avoir conscience du biais qu'il risque d'induire en endossant le double rôle d'expérimentateur et d'enseignant en charge des participants (**Torlind et al., 2009**). Ce biais est évité grâce au mode de recrutement des étudiants pour l'école d'hiver, indépendante des

modules d'enseignement assurés par le chercheur à l'université. Ce dernier encadre les groupes lors de l'expérimentation et peut, le cas échéant, répondre aux questions posées.

4.3.3 Déroulement détaillé

Six équipes de quatre personnes, réputées homogènes, mêlent les différents profils. Le choix de ce nombre de personnes par groupe permet de garantir un équilibre des opinions contradictoires (**Cash et al., 2011**). Il est demandé à deux des équipes de suivre une perspective de cycle de vie traditionnelle basée sur une matrice Matériau Energie Toxicité (MET). Deux autres groupes ont suivi une perspective «Partie Prenante» basée sur une matrice MET transformée, pour laquelle les étapes de vie sont remplacées par des parties prenantes. Une condition de contrôle a été ajoutée pour les deux derniers groupes, libres d'adopter une approche de leur choix. Les six groupes travaillent dans des box adaptés à l'activité de conception, et les échanges verbaux sont enregistrés à l'aide d'une caméra vidéo dans chaque box (Figure 46).



Figure 46: Installation du groupe de contrôle 2

Le protocole expérimental comporte trois temps distincts (Figure 47) et se déroule en langue anglaise. La veille de l'expérimentation (J-1), tous les participants bénéficient d'une session de formation de deux heures sur les notions de base de l'éco-conception (impact environnemental, cycle de vie, Unité Fonctionnelle) et sur les principales étapes du processus d'éco-conception grâce à plusieurs exemples. Les étudiants des groupes «Contrôle» et «Parties Prenantes» assistent à une présentation spécifique du concept de partie prenante. Le questionnaire d'entrée Q1 permet de connaître le profil de l'étudiant (formation et expertise

en éco-conception) ainsi que sa vision initiale de la problématique environnementale sur l'aspiration des poussières. Le jour de l'expérimentation (J), une activité rapide de mise en condition, dite «brise-glace», est proposée à chaque groupe où il s'agit de définir un nom et un slogan pour le nouveau produit. A la fin de l'activité de reconception, les étudiants remplissent un questionnaire «flash» Q2 de perception du processus «à chaud».

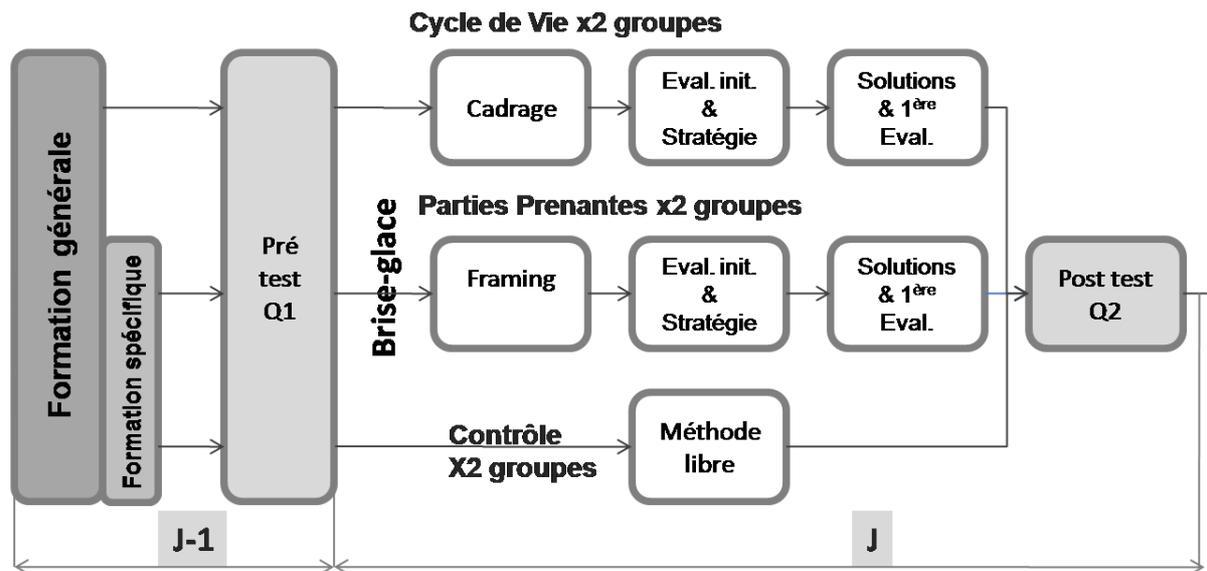


Figure 47: Déroulement de l'expérimentation ASPI

4.3.4 Résultats

4.3.4.1 Pré test: perception initiale de la problématique environnementale

Le pré-test Q1 (taux de réponse 100%) pose une question ouverte sur les problèmes environnementaux auxquels on peut s'attendre concernant l'aspiration des poussières. Chaque étudiant a fourni de 1 à 4 réponses (moyenne: 2,37), qui ont été classées en trois catégories par le chercheur: Matériaux, Energie et Usage (Figure 48). La question de la consommation d'énergie a été la plus citée (33% des réponses), suivies de l'usage de matières non renouvelables (12%) et de la nuisance sonore (11%).

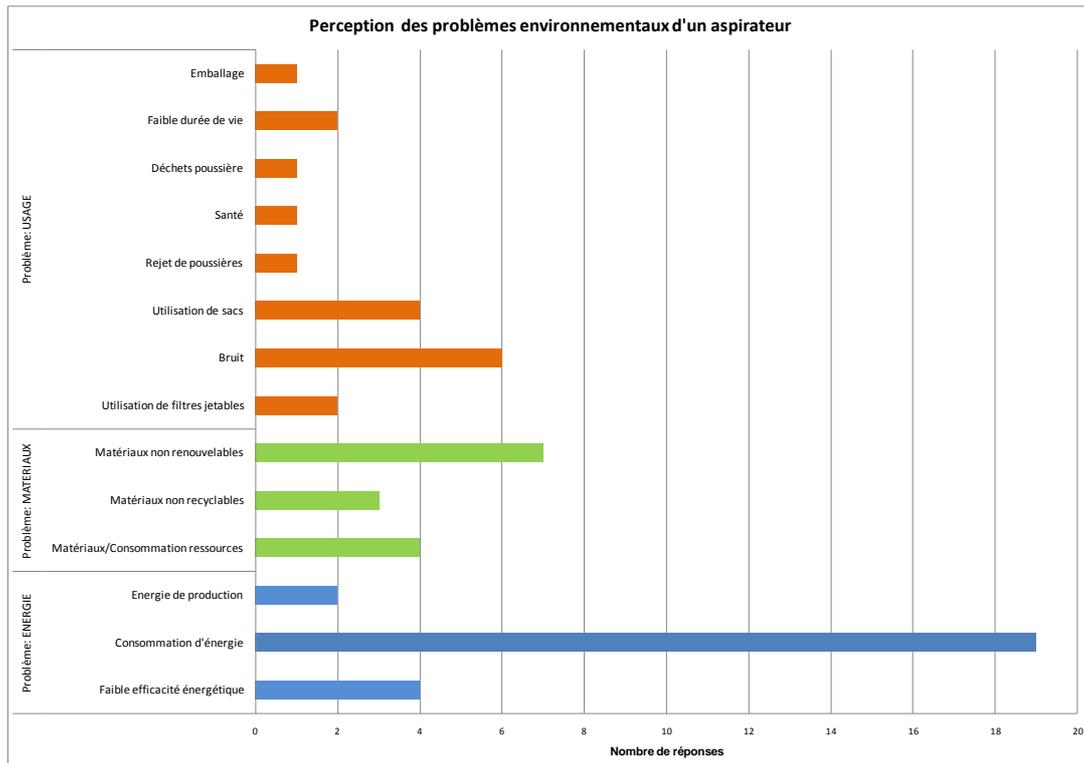


Figure 48: Identification des problématiques environnementales de l'aspiration de poussières

4.3.4.2 Post-test: perception du processus d'éco-conception

Le questionnaire «flash» Q2 (taux de réponse 96%) a pour but de recueillir l'évolution de perception du processus d'éco-conception en fonction de la méthode de travail suivie. Quatre critères d'appréciation ont été retenus: la clarté de la problématique environnementale, la simplicité de cette problématique, l'étendue de l'espace des solutions et le caractère systématique de l'approche employée. La formulation des questions pour les deux premiers critères est la suivante: «Que pensez-vous de la problématique environnementale de l'aspiration des poussières ? Cette problématique vous apparaît-elle **plus claire, identique** ou **plus obscure** qu'hier ? La jugez-vous **plus simple, identique** ou **beaucoup plus complexe** qu'au départ ? » D'après les réponses (Figure 49), il est notable que:

- Pour la majorité des étudiants (58%), la problématique environnementale de l'aspiration des poussières apparaît plus claire après le test;
- Les opinions sont partagées en ce qui concerne la complexité perçue de la problématique environnementale après le test;

- 75% des étudiants jugent les solutions proposées par leur équipe plus variées que celles trouvées individuellement;
- Il n'y a aucune différence significative dans la perception générale du processus entre les groupes ($\text{Khi}^2=4,96$; $\text{Khi}^2(0,05)= 11.97$) malgré la différence d'accompagnement méthodologique entre les groupes de test et de contrôle. Étonnamment, le processus suivi est tout autant qualifié de «flou» que de «systématique» quelque soit le groupe.

Dans la zone de commentaires libres, il est fait allusion dans plus de la moitié des cas au bénéfique et au plaisir de travailler en équipe multidisciplinaire et multiculturelle. A contrario, environ 1/5 des remarques fait état de la difficulté à avancer efficacement dans ce contexte. Enfin, le manque de temps de développement a été mentionné comme un facteur limitant par deux étudiants.

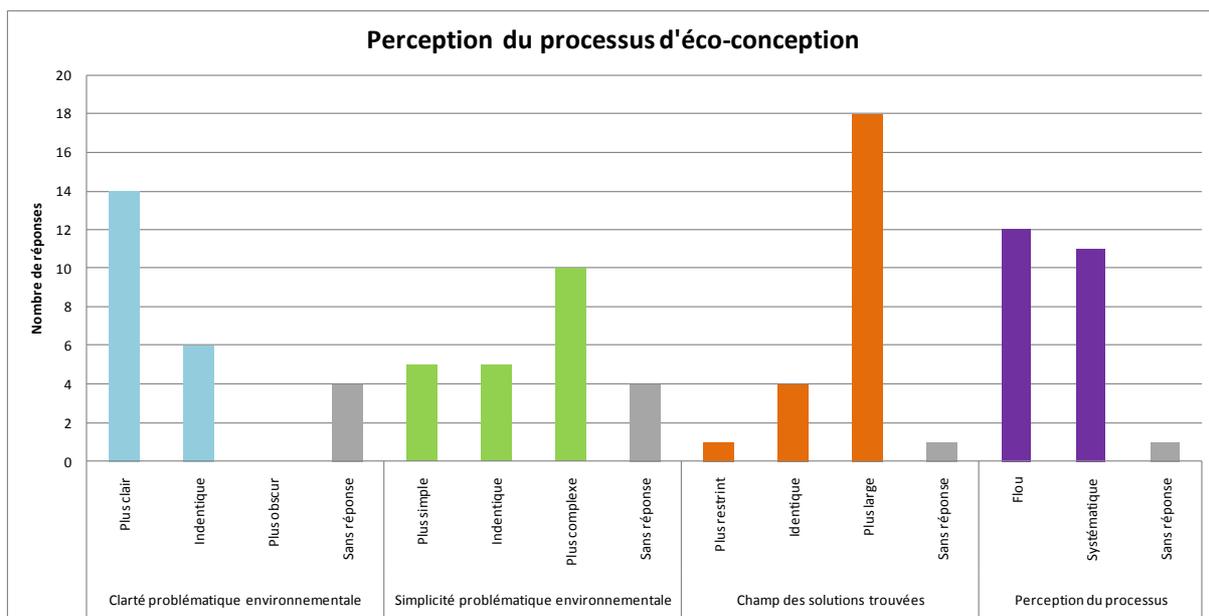


Figure 49 : Perception du processus d'éco-conception par les étudiants

4.3.4.3 Cadrage problématique

Il est explicitement demandé aux groupes «Cycle de Vie» (L1 et L2) et «Parties Prenantes» (ST1 et ST2) de faire un cadrage problématique. L1 et L2 doivent esquisser le cycle de vie de l'aspirateur, proposer une Unité Fonctionnelle (UF) et mettre en évidence les étapes les plus

impactantes du cycle de vie. Les deux groupes identifient le pétrole et les métaux dans les flux de matières, auxquels s'ajoute le bois pour la production de papier (cité par L2). L1 parvient à indiquer les composants à un niveau intermédiaire de décomposition pour l'assemblage (Figure 50). Ce groupe ne répond pas à la question sur l'UF et les phases les plus impactantes; L2 propose «480 heures d'aspiration de poussières» et définit, par ordre d'impact décroissant: Usage, Fin de Vie et Extraction des Matériaux.

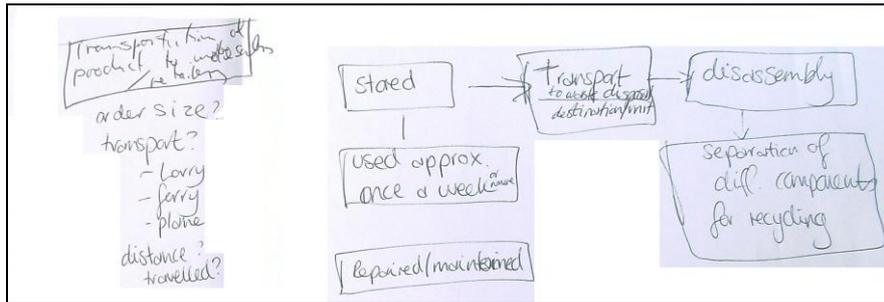


Figure 50: Extrait du cycle de vie du groupe L1

Les groupes ST1 et ST2 doivent cartographier et localiser les diverses parties prenantes associées à la problématique. Les réponses sont classées a posteriori en parties prenantes internes et externes par le chercheur (Tableau 21). Trois parties prenantes sont communes aux deux groupes: le consommateur, les marketeurs et les logisticiens. Le second groupe couvre un champ plus large de parties prenantes, y compris le fournisseur d'énergie. Ce choix semble particulièrement judicieux pour cette étude.

Tableau 21: Cadrage des parties prenantes

Groupe	Parties prenantes identifiées	
ST 1	Internes Investisseurs Marketeurs	Externes Greenpeace Gouvernement Europe Transporteurs Consommateur
ST2	Management (WE ¹) Concepteur (WE) Production (EE ²) Marketing Service client	Consommateur Institut de Recherche (WE) Concurrent (WE) Législateur (Europe) Fournisseurs (EE)

	Distributeurs pièces (WE)	Logisticiens (WE) Distributeur (Europe) Recycleur (WE) Fournisseur d'énergie (WE)
--	---------------------------	---

¹Western Europe; ²Eastern Europe

4.3.4.4 Evaluation environnementale initiale

Les équipes L1 et L2 apportent des réponses qualitatives dans la matrice MET fournie, (Figure 51). Les réponses des catégories «Matériaux» et «Energies» sont similaires. Comme les procédés de fabrication des composants de l'aspirateur ne sont pas connus précisément, les réponses restent génériques (par exemple «Process energy»). Une plus grande confusion apparaît dans la catégorie «Toxicité», où l'on voit apparaître aussi bien émissions de CO₂, électricité ou encore «sacs en papier».

	Group	Extraction	Production	Distribution	Use	End of Life
Material	L1	Metal Petrol Rubber Wood	Plastic Rubber Metal Glue	Cardboard Plastic Paper (instructions)	Paper bag	Recycle metals Recovery
	L2	Metal Fossil oil (plastic) Paper	Metal Water waste	Packaging	Bag Spare parts	Metal Plastic
Energy	L1	Nuclear power Fossil fuels Renewable energy sources	Process energy	Fuel Electricity	Electricity Man power	
	L2	Extraction energy	Process energy	Fuel	Electricity	? Energy for recycling
Toxicity	L1	Pollution caused by extraction of raw material e.g. greenhouse gases Nuclear waste Environmental destruction e.g. habitats	Waste from production	Carbon emissions	Electricity (source ?)	Pollution x2
	L2	Toxic waste, CO ₂ , Chemicals used to clean the material	Toxic waste <i>To be investigated.</i> <i>What are the chemicals ?</i>	CO ₂ (truck, boat)	<i>Bags maybe ?</i>	Landfilled if not recycled Gaz if burnt Chemicals if recycled

Figure 51 : Matrices MET remplies par les groupes L1 et L2

Pour les groupes ST1 et ST2, il a d'abord fallu sélectionner 3 ou 4 parties prenantes. Puis la matrice MET modifiée a été introduite par l'intermédiaire de la question suivante: “*What are the expectations and requirements of the stakeholder St_i regarding environmental impacts or values?*”. Les réponses du groupe ST1 sont fournies pour illustration (Figure 52).

Impacts/ Values	ST1: European Union	ST2: Consumer	ST3: Transporters	ST4: Investors/Marketors
Material	European renewable resources	Light Ecological Best Quality/Price	Volume, lighter	Sustainable materials (to appear sustainable for customers but short life span)
Energy		Energy consumption (bill) Efficient (using 1h instead of 2h)	Env. friendly boats with huge kites	
Toxicity		No toxic material No burn plastic No bags	Sea life	
Other	Rules, Laws, Standards of faire trade (social impacts) Fair contracts for workers	Long cable Attractive packaging Easy to store Not to expansive Cheapest Low noise level Design Used on all surfaces	Social impacts: transporters with EU contracts (under EU laws)	Connect product image to appeal to the market demographic Brand image collaboration with Dyson brand to increase product sales « Recommended by » sticker

Figure 52 : Matrice MET modifiée remplie par le groupe ST1

4.3.4.5 Recherche de solutions et première évaluation des solutions

La dernière étape est consacrée à la recherche de plusieurs idées d'amélioration du produit suivie d'une appréciation qualitative des performances environnementale et créative des idées. Les propositions sont le plus souvent liées à des problématiques que rencontre le consommateur final: bruit, consommation de sacs et d'énergie (Tableau 22).

Tableau 22: Solutions générées par les groupes ASPI

Groupe	Solutions
Contrôle 1 (C1)	High efficiency motor; smart filter (ionizing particles); round brush (for power saving); renewable manufacturing energy; recycle packaging; dust container instead of bags; integrated circuits to prevent current leakage; energy recovery.
Contrôle 2 ¹ (C2)	Move: hovering; Materials: natural fibers, composites; Energy: battery; Particles: water...
Life Cycle 1 (L1)	Plaited natural fiber pipe; no bags; wood panel structure (also vibration absorber); energy efficient motor.
Life Cycle 2 (L2)	Standard component; compostable housing; solar energy; electromagnetic field; no bags; eco-friendly materials; KERS ² on the nozzle; reward for reusable materials; "dust claimer" house; musical program to reduce noise; artificial spit.
Stakeholder 1 (ST1)	Baby-shaped, plant-shaped (with batteries in a pot) vacuum cleaner; "Dyson" concept with water filter.
Stakeholder 2 (ST1)	Hybrid vacuum cleaner; solar energy; silent vacuum cleaner; bacteria filter; kids vacuum cleaner; retractable tube; water/liquid vacuum cleaner; "Xbox".

¹Extrait des concepts générés ; ²Kinetic Energy Recovery System

A la différence des autres, le groupe «Contrôle 2» met en œuvre une matrice morphologique à neuf critères fonctionnels en ligne et 5 concepts en colonne (Figure 53). A l'autre extrême, les solutions proposées par le groupe ST1 sont issues de recherche de formes alternatives, indépendamment de toute considération fonctionnelle ou de réduction d'impact environnemental. Le groupe L1 parvient à synthétiser l'ensemble de la recherche créative sous forme d'un schéma de concept (Figure 54). Le carénage en bois permet à la fois d'absorber les vibrations et de limiter l'utilisation de matières non renouvelables.

	①	②	③	④	⑤	⑥
move/handling	wheels	bag back	hovering	sliding	sphere	
material	composites	Smart material	Alloys	Alloys	Material	
envelope supply type	battery	St. Res. Unit	fuel cells	combined engines	Direct Wireless connection	⊗
particle handling	Sieve	Widened	Swinging			
appearance	leaf	oblong	Single	square	Vacuum	SMART
price labels	low	Exp. Tech	low			
durability	Retard	Retard	Strong			
functionality	Main	Intelligent				

Figure 53: Matrice morphologique du groupe «Contrôle 2»

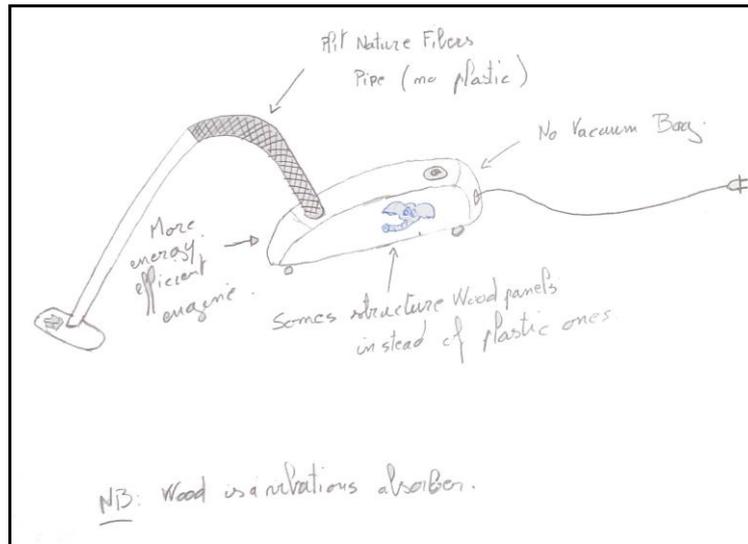


Figure 54: Proposition de concept du groupe L1

4.3.5 Discussion des résultats de l'expérimentation ASPI

4.3.5.1 Traitement des étapes du processus par les novices (A1)

Contrairement aux conclusions de **Collado & Ostad-Ahmad-Ghorabi (2010)**, les informations environnementales de niveau intermédiaire sont peu (ou pas) utilisées par les étudiants. Après lecture des documents, ils n'ont pas su choisir les éléments pertinents pour la réalisation de l'activité proposée. C'est une piste de réflexion à ne pas négliger dans un contexte de formation à l'éco-conception.

La démarche pas-à-pas introduite lors de la session de formation n'est reprise par aucun des deux groupes de contrôle. On peut supposer qu'à l'instar de concepteurs confirmés, les étudiants font le choix, hors contrainte, de mettre en œuvre des méthodes déjà connues. Cela peut leur permettre de limiter l'effort cognitif lié à la mise en place d'une nouvelle pratique. Ainsi après une période de flottement, le groupe de contrôle 1 pratique-t-il une recherche d'idées individuelle suivie d'un brainstorming collectif. Le groupe de contrôle 2 (auquel appartient la seule non débutante du groupe) décline rapidement un ensemble de principes de déplacement qui sont ensuite évalués en regard de critères mixtes (i.e. environnementaux et fonctionnels). La seconde constatation que nous sommes amenés à faire est qu'en l'absence de contraintes, les étudiants commencent par chercher des solutions de principe avant toute évaluation. Cela va dans le sens de **Le Pochat (2005)** selon lequel l'amélioration demande

bien moins d'expertise que l'évaluation environnementale. D'autre part, l'observation est en cohérence avec le fait qu'en conception traditionnelle, les concepteurs éprouvent le besoin d'imaginer des premières solutions pour pouvoir cadrer le problème posé (**Restrepo & Christiaans, 2004 ; Dorst, 2001**). Enfin, il est à souligner que l'expression d'une stratégie environnementale permettant de déterminer les actions correctives à envisager en priorité n'est pas abordée par les novices.

4.3.5.2 Efficacité des outils dans l'intégration des parties prenantes (A2)

Peut-on affirmer qu'il y a une différence notable de réalisation de l'activité d'éco-conception chez des débutants suivant qu'ils utilisent une vision basée sur le cycle de vie ou sur les parties prenantes? Nous relevons les tendances suivantes.

La représentation du cycle de vie d'un aspirateur apparaît être une étape véritablement délicate pour les étudiants. Ils expriment en particulier des difficultés concernant le niveau de détail des composants qu'ils sont censés décrire. Pour l'un des participants, il n'y a pas de différence entre le cycle de vie demandé et la matrice MET. Si la notion de cycle de vie constitue une base indiscutable de la pratique de l'éco-conception, elle mérite qu'on prenne le temps nécessaire pour la transmettre dans le cadre d'une formation.

A contrario, l'approche de la problématique par le biais des parties prenantes élimine la question de la décomposition directe du produit en sous-composants. Elle semble plus simple à envisager pour les étudiants de Conception de Produits et de Business Management. Cependant quelques points durs sont à noter. Premièrement, il peut être difficile de localiser les parties prenantes dans un cas fictif comme celui-ci. Deuxièmement, et c'est une limite, remplir une matrice MET en considérant à la fois impacts et valeurs créées pour les parties prenantes nécessiterait d'être expliqué de façon plus précise.

En tout état de cause, les quatre groupes (hors contrôle) se révèlent perturbés par la question de la *toxicité*. La réalité présente derrière les substances toxiques semble tout à fait opaque pour les étudiants, qui y associent aussi bien la pollution que les émissions de CO₂.

4.3.6 Limites de l'expérimentation ASPI

Nous pensons utile de relever certaines limites à l'issue de cette expérimentation. Pour reprendre le commentaire de certains participants, nous disposons finalement de très peu de **temps** pour mettre en œuvre et observer un déroulement d'un processus d'éco-conception complet appliqué à un produit de complexité moyenne. Ce qui n'est pas un obstacle majeur pour des experts devient une source réelle de difficulté -et même de frustration- pour des novices. Pour limiter cet effet négatif, il serait souhaitable de mettre en œuvre un protocole expérimental sur une durée plus longue, au cours d'un module complet d'enseignement par exemple. Malgré un bon niveau requis à l'entrée du programme, l'anglais n'est pas la langue maternelle de la moitié des étudiants, ce qui peut rendre les échanges plus difficiles dans un contexte où ceux-ci ont l'impression de devoir fournir des résultats satisfaisants (car l'expérimentation peut être perçue comme un exercice d'évaluation).

4.4 Le Cas LUMINAIRE

Ce paragraphe est consacré à la reconception d'un luminaire d'extérieur, commun à nos travaux et à ceux de **Tyl (2011)**. Nous nous limitons à la phase de recherche de solutions, contrairement aux deux cas précédents qui embrassaient une part plus large du processus d'éco-conception. L'expérimentation a été organisée en mars 2010 dans le même cadre que BARBARAZ avec les experts du réseau EcoSD. Ce travail de groupe, que nous avons animé, nous donne l'opportunité d'examiner comment la dimension de remise en cause des produits et services est abordée en phase de recherche préliminaire de concepts. L'hypothèse que nous souhaitons tester s'exprime de la façon qui suit:

(L1) Au cours du processus de recherche de solutions mis en œuvre par des éco-concepteurs expérimentés, il est possible de faire varier les niveaux de remise en cause des idées grâce à l'utilisation d'outils.

(L1) se situe dans le prolongement de l'hypothèse (B3), qui s'attachait à caractériser la performance environnementale et créative des idées d'amélioration (Figure 55).

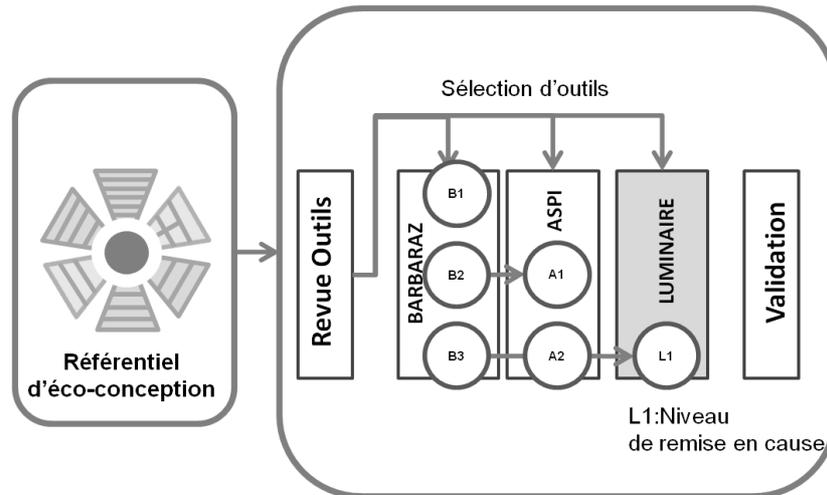


Figure 55: Hypothèse du cas LUMINAIRE

4.4.1 Résultats et discussion de l'expérimentation LUMINAIRE

Quatre outils ont été initialement testés. Pour ce travail, nous nous intéressons uniquement aux trois groupes qui ont utilisé des outils d'éco-conception et d'éco-innovation: roue d'éco-conception (**Brezet & Van Hemel, 1997**), Eco Compass (**Fussler & James, 1996**) et EcoASIT (**Tyl, 2010**). Il a été demandé aux participants de générer le plus grand nombre d'idées possibles pour limiter les impacts en cycle de vie du produit actuel. Ces idées ont été extraites, puis classées par deux experts en 6 catégories (**Tyl, 2011**). A partir de ces données, nous appliquons notre propre échelle de remise en cause et comptabilisons le nombre relatif (en pourcentage) de concepts par catégories (Tableau 23). Pour ce cas d'étude, nous définissons l'amélioration du produit par l'intégration d'une technologie existante déjà éprouvée, sans remise en cause du mode de fonctionnement de la lampe: par exemple verre autonettoyant, lampe à LED ou lampe basse consommation. Le niveau de reconception recouvre typiquement l'utilisation d'un mode d'énergie autre qu'électrique: éolien, mécanique (développée par les passants) etc.

Il est à noter que la proposition initiale d'échelle de variabilité comporte quatre classes internes à ce que nous nommons «Innovation système», ce qui semble logique dans une perspective d'éco-innovation. Les résultats montrent que l'outil Eco-ASIT, par des mécanismes de stimulation spécifiques, permet aux éco-concepteurs d'envisager trois fois plus de solutions à un niveau systémique supérieur que les outils LiDS Wheel et Eco

Compass. La mise en œuvre de ces deux derniers outils conduit quasi exclusivement à une amélioration ou à une reconception de produit. Par contre, l'évolution du produit vers un nouvel usage moins impactant ne semble pas du tout encouragée par les deux outils d'éco-conception, et l'est très peu par l'outil EcoASIT. Ce résultat mérite d'être retenu dans le cadre de la formation à l'éco-conception. Il faudra veiller à mobiliser des approches et outils tournés spécifiquement vers les usages responsables pour couvrir ce niveau de remise en cause.

En conclusion, l'hypothèse (L1) est validée puisque différents niveaux systémiques de remise en cause sont bien mis en évidence avec les différents outils utilisés.

Tableau 23: Pourcentage d'idées émises en fonction du niveau de remise en cause

Echelle de remise en cause Notre proposition	Echelle de variabilité (Tyl, 2011)	Outil utilisé		
		Eco ASIT	Roue d'écoconception LiDS Wheel	Eco Compass
Amélioration produit	Produit	12	47	45
Reconception produit		42	47	35
Innovation fonctionnelle	Usage	12	0	0
Innovation système	Produit Service	33	6	20
	Service			
	Méthode			
	Stratégie			

4.4.2 Limites de l'expérimentation LUMINAIRE

Si la variabilité du niveau de remise en cause des idées peut être conclue sans équivoque, l'attribution d'un ou plusieurs niveaux à un outil doit rester indicative. Il faudrait multiplier le nombre de groupes utilisant chaque outil pour pouvoir généraliser les conclusions précédentes.

4.5 Synthèse des études avec observation

L'observation de concepteurs en situation (certes construite) d'éco-conception nous conduit à de premières conclusions sur ce qui constitue la compétence environnementale. Nous choisissons de décliner le résultat des observations sur la dimension «Processus», puisque c'est le point de vue commun à deux des trois expérimentations (BARBARAZ et ASPI).

4.5.1 Mise au point d'une stratégie environnementale et recherche de solutions

L'activité typique de l'expert en éco-conception est l'établissement d'une stratégie environnementale adaptée au produit considéré, c'est-à-dire l'énoncé des voies d'amélioration les plus prometteuses et de leur hiérarchisation. Cela a été remarqué dans le cas (simple) du rasoir jetable, où la définition de stratégie s'est révélée homogène entre les groupes et a été réalisée immédiatement «hors outil». Cette même activité n'est pas comprise par les novices. Plusieurs interprétations sont possibles, et nécessiteraient sans doute d'autres investigations. Premièrement, mettre au point une stratégie suppose de connaître préalablement des pistes et d'avoir de l'expérience (ou à défaut des éléments de décision) pour accorder une importance relative entre différentes problématiques environnementales. Cette posture de recul semble clairement hors de portée de débutants. Deuxièmement, la terminologie elle-même est bloquante comme semblerait le montrer les résultats du premier questionnaire ASPI. En effet, lorsqu'on demande aux étudiants de donner des premières idées d'amélioration, les réponses se situent non à un niveau technique détaillé, mais précisément à un niveau intermédiaire de stratégie (par exemple «Limiter le bruit»).

L'activité de recherche de solutions semble pratiquée avec une égale facilité par novices et experts, ce qui confirme que l'amélioration environnementale est plus accessible que l'évaluation (**Le Pochat, 2006**). Finalement la recherche de solutions apparaît facile d'accès et même structurante pour les novices. Nous en concluons qu'il y a là un point d'entrée bien plus évident que ceux mis en avant dans les démarches pas-à-pas existantes, qui commencent souvent par une évaluation environnementale.

Dans les deux contextes (novice et expert) les solutions produites restent partielles et ne sont pas-ou peu- intégrées sous forme d'un ou plusieurs concepts complets. Cela peut tout aussi

bien être un biais expérimental, lié à un manque de temps de développement, ou à un manque de pression dans un contexte industriel réel.

4.5.2 Définition d'un scénario éco-fonctionnel

Nous avons mis en évidence la construction d'un raisonnement dit «**éco-fonctionnel**» par les experts. Par scénario éco-fonctionnel nous entendons ici le **cadrage itératif et quantitatif des consommations diverses associées à un cycle d'usage et de vie d'un produit**. L'aboutissement de ce raisonnement est, selon nous, la fameuse Unité Fonctionnelle, qui s'apparente davantage à un résultat de discussion qu'à un élément préexistant à l'analyse. Comme le suggère l'animateur du groupe EcoDesign PILOT (Ligne 185), «*Il y a des cas (où) il faudrait faire une étude*», ce qui souligne l'intérêt du recours à des études sur la consommation pour mener le cadrage éco-fonctionnel. Ce type d'informations est partiellement disponible dans les Executive Summary des Directives EuP pour les produits consommateurs d'énergie.

L'hypothèse de la construction d'un **scénario éco-fonctionnel** en vue d'une évaluation en phase amont de la conception demanderait à être validée plus avant avec une autre typologie de produit que la rasoir jetable, qui oriente potentiellement les discussions sur la phase d'usage au détriment des autres phases.

Par confrontation, la vision éco-fonctionnelle qui se dégage ici peut faire penser à une négociation Function Behavior Structure (**Gero, 1990**) pour laquelle, selon le schéma de codage BARBARAZ :

- F serait représenté par la catégorie Stratégie environnementale (St);
- B serait représenté par la catégorie Evaluation Initiale et notamment par la consommation;
- S serait représenté par la recherche de solutions (So).

Le premier schéma de codage avait pour avantage de permettre une analyse détaillée de la partie «Contenu» et de la partie «Gestion collective du Processus d'éco-conception». Si nous mettons de côté ce deuxième aspect, le modèle FBS pourrait permettre une compréhension du travail de cadrage itératif de la problématique d'éco-conception. Il nous semble porteur d'examiner cette piste lors de futurs travaux.

4.6 Validation des résultats

Afin d’avoir un retour externe sur la pertinence et l’exhaustivité des dimensions proposées, nous procédons à un **entretien** avec quatre responsables nationaux de formation à l’éco-conception de produits. De façon complémentaire, les responsables sont interrogés sur les outils utilisés et les compétences attendues en fin de cursus. Notons que nous nous restreignons volontairement aux formations orientées sur l’éco-conception de produits manufacturés ou services. L’aboutissement des résultats d’observations et d’entretiens résulte en un ensemble organisé de connaissances de l’éco-concepteur (Figure 56).

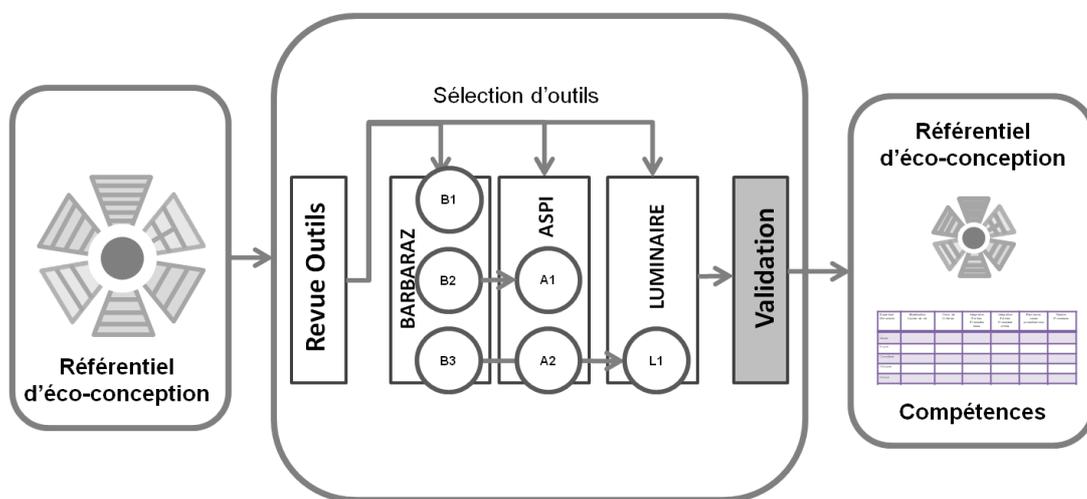


Figure 56: Validation des résultats

L’entretien comporte un jeu de 10 questions ouvertes suivies de 28 questions fermées (ANNEXE 8). L’association de ces deux types de questions permet d’avoir une triangulation des informations recueillies (**De Singly, 2005**). A l’issue de chaque entretien, les échanges transcrits par écrit sont envoyés aux responsables pour corrections éventuelles. Les entretiens concernent les formations de cursus ingénieur et master de quatre établissements français: Université de Technologie de Troyes, Supméca Toulon, Ecole Centrale Paris, ISA Lille, (Tableau 24).

Tableau 24: Etablissements supérieurs français proposant une formation à l'éco-conception

Etablissement	Formation(s)	Niveau	Nombre heures
Université de Technologie de Troyes (UTT)	Master IMEDD	Master	51h
	Filière Matériaux option "Eco-matériaux et Environnement"	Ingénieur	76h
	Filière Génie Industriel	Ingénieur	76h
Supméca Toulon (ST)	Spécialité 3 ^{ème} année, Méthodologie et Innovation en Conception Intégrée	Ingénieur	80h
Ecole Centrale de Paris (ECP)	Génie Industriel parcours "Innovation"	Ingénieur	12h
	Environnement Matière Vivant	Ingénieur	6h
	Filière Conception et Industrialisation de Systèmes Innovants (CISI)	Ingénieur	30h
ISA Lille (ISA)	Master2 Environnementaliste	Master	111h

4.6.1 Outils d'éco-conception utilisés en formation

Cette partie des entretiens met en lumière les choix d'outils opérés sur le terrain académique pour répondre à des objectifs d'apprentissage de l'éco-conception (Tableau 25).

Sans surprise, l'ensemble des cursus comprennent l'utilisation d'un outil d'analyse de cycle de vie (qui se trouve être SimaPro dans 3 cas sur 4) ou d'une version simplifiée de l'ACV comme Bilan Produit dans le dernier cas. Certains outils traditionnellement utilisés en conception (Analyse Fonctionnelle, QFD, AMDEC) apparaissent ici, confirmant la complémentarité des approches de conception et d'éco-conception.

L'ouverture aux parties prenantes prend plusieurs formes. Il peut s'agir de conférences de témoignage de certains acteurs investis dans une démarche de Développement Durable (Ecole Centrale de Paris). L'examen de résultats collectés dans les laboratoires d'analyse des usages permettent de mieux caractériser les comportements des consommateurs vis-à-vis de l'environnement (Supméca Toulon). A l'UTT, la mise en oeuvre du jeu sérieux B to Green permet aux étudiants de comprendre les enjeux de l'éco-conception pour les acteurs industriels de la chaîne de valeur.

Tableau 25: Outils utilisés dans les cursus de formation à l'éco-conception

Etablissement	Université de Technologie de Troyes	Supméca Toulon	Ecole Centrale de Paris	Institut Supérieur d'Agronomie de Lille
Dimension				
Modélisation des Cycles de Vie	ACV	ACV	SimaPro Bilan Produit	Bilan Produit
Choix et Gestion de Critères	SimaPro	Buwal SimaPro Prodtect	SimaPro Bilan Produit	<i>Sans Réponse</i>
Parties Prenantes Industrielles	B to Green	Supply Chain	<i>Sans Réponse</i>	Néant
Parties Prenantes Civiles		Normes NF Laboratoire usages	Conférences	Néant
Remise en cause		AF QFD AMDEC Laboratoire usages	<i>Sans Réponse</i>	Bilan Produit
Gestion du Processus		AF QFD AMDEC		Roue de Demming Roue Eco Stratégie

4.6.2 Pertinence des dimensions et niveaux du référentiel

Cette partie des entretiens sert à appréhender la pertinence des dimensions et niveaux pour décrire un programme pédagogique d'éco-conception. Compte tenu du nombre réduit de réponses, les éléments qui suivent ne peuvent bien entendu constituer qu'un premier retour, partiel, sur la proposition. Trois des personnes interrogées estiment le référentiel bien adapté à la description de la formation à l'éco-conception (Très bien adapté: 2/4; Bien adapté: 1/4). Le dernier responsable ne se prononce pas sur cette question par manque de compréhension de la proposition agrégée des dimensions. Les enquêtés sont d'autre part d'accord sur le fait que l'on ne peut se passer d'aucune des dimensions évoquées (3/4). L'un des responsables fait cependant remarquer que la dimension de **gestion du changement** fait défaut. Le référentiel

reçoit donc un accueil favorable des responsables de formation que nous avons contactés. Cela constitue une première étape de validation de nos travaux.

En synthèse de cette étape nous construisons un tableau de caractérisation thématique des formations à l'éco-conception des produits et services au plan national (Tableau 26). Ce travail est réalisé par deux chercheurs, l'ensemble résultant du consensus entre les deux caractérisations. Le tableau comporte d'une part les résultats de l'entretien avec les experts, et d'autre une caractérisation complémentaire des autres cursus de formation réalisée à partir de sites web ou de retours d'étudiants.

Tableau 26: Caractérisation thématique des formations nationales d'éco-conception

	Cycle de vie	Critères	PP Indus.	PP Civiles	Remise en cause	Processus													
	Cycle partiel																		
	Cycle complet																		
	Cycles multiples																		
	Critères techniques (Mono/Multi)																		
	Critères environnementaux (Mono/Multi)																		
	Critères Développement Durable																		
	Expert(s) environnement																		
	Equipe de conception & expert environnement																		
	Entreprise étendue																		
	Ecosystèmes d'entreprises																		
	Consommateur final																		
	Communautés																		
	Organismes d'état																		
	Amélioration																		
	Reconception produit																		
	Innovation Produit																		
	Innovation Systèmes																		
	Définition des objectifs																		
	Diagnosti c/Eval. Initiale & Hiérarchisation																		
	Pré-conisations																		
	Evaluation environnementale																		
	Représentation																		
	Communication																		
Etablissement	Référentiel: dimensions et niveaux couverts par la formation															Confiance*			
Université de Technologie de Troyes (UTT)				MJ															5
				MJ															5
				MJ															5
Supméca Toulon (ST)				MJ															5
Ecole Centrale de Paris (ECP)				MJ															5
Université de Besançon				MJ															2
ISA Lille (ISA)				MJ															4
ENSAM Chambéry				MJ															3
INP Grenoble				MJ															4

- * **Confiance**
- 1 Informations succinctes recueillies sur le w eb
 - 2 Programme détaillé consulté sur le w eb
 - 3 Informations w eb recoupées avec retours d'étudiant(s)
 - 4 Contenu des supports de formation recoupés avec retours d'étudiant(s)
 - 5 Enquête directe auprès des responsables de formation et retours eventuels d'étudiants

4.6.3 Représentation des compétences de l'éco-concepteur

En résumé du travail empirique (étude bibliographique des outils, observations en situation et entretiens sur la formation), nous proposons de décliner l'échelle de **Le Pochat (2005)** (Figure 18) grâce aux dimensions retenues pour la formation à l'éco-conception (Figure 57). Nous pouvons ainsi dresser une trame de description macroscopique des thématiques que doit traiter un programme de formation à l'éco-conception en fonction du niveau d'expertise des concepteurs.

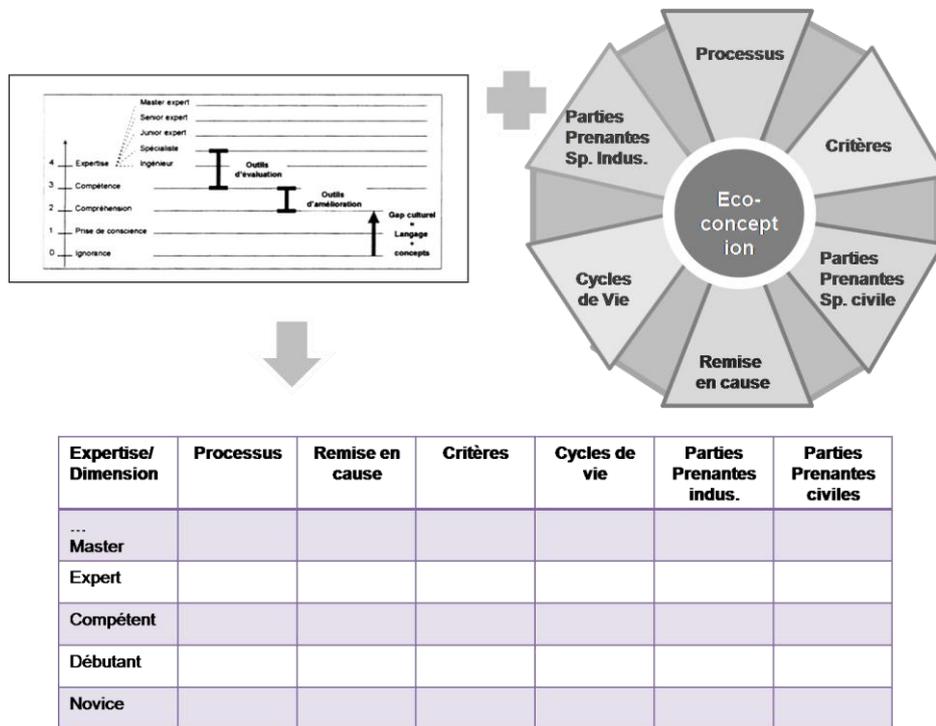


Figure 57: Construction d'un référentiel de compétences en éco-conception

La dernière partie des entretiens contribue à valider et à compléter les compétences mises en évidence lors du travail expérimental (Tableau 27). En complément des compétences, connaissances et pratiques les plus citées, nous relevons:

- L'importance de la notion d'**Unité Fonctionnelle**, qui consiste à rapporter un service à une consommation de matière et d'énergie;

- Le caractère **relatif** de l'éco-conception. "*Le caractère éco-conçu du produit est directement conditionné par l'environnement dans lequel ce dernier va vivre*" (ECP);
- La compréhension du **projet global d'éco-conception**, qui ne se résume pas à une simple évaluation environnementale;
- La compréhension de **l'échange d'informations** qui a lieu au cours du processus d'éco-conception.

Tableau 27: Compétences d'éco-conception issues des entretiens

Dimension	Compétences exprimées
Modélisation des Cycles de Vie	Identifier les étapes d'un cycle de vie; Modéliser les systèmes à cycles multiples (ST) Modéliser un cycle de vie avec scénarisation probabilisée de phase d'usage; de fin de vie (ECP) Identifier les points forts et faibles en cycle de vie. Identifier les étapes sur lesquelles agir (ISA) Réaliser une ACV (UTT)
Choix et Gestion de Critères	Gérer la notion multicritère; identifier les conflits entre critères (ST) Sélectionner les critères pertinents pour le projet (ISA) Prendre en compte des critères environnementaux, techniques, économiques et sociaux
Parties Prenantes Industrielles	Modéliser de nouveaux modèles d'affaires (ST) <i>Peu abordé (ISA)</i>
Parties Prenantes Civiles	Comprendre les motivations des consommateurs à agir pour l'environnement (ST) <i>Peu abordé (ISA)</i>
Remise en cause	Comprendre les implications de technologies et fonctions sur les impacts (ST) Identifier les axes d'amélioration ou de reconception du produit (ISA) Reconcevoir avec ou sans amélioration fonctionnelle (UTT)
Gestion du Processus	Faire un bilan écologique initial; Reconcevoir ou innover avec un objectif environnemental (ST) Améliorer la fin de vie. Manager la dimension environnementale dans un processus (ST) Choisir les outils adaptés au projet pour gérer le processus (ISA) Mener à bien le processus complet sur un projet (UTT)

UTT: Université de Troyes; ST: Supméca Toulon; ECP: Ecole Centrale de Paris; ISA: ISA Lille

En ce qui concerne le cycle de vie, le cas avec produits dérivés valorisés ou des produits innovants multifonctionnels, difficiles à traiter, n'apparaissent pas dans la formation (ECP).

La dernière étape de formalisation des compétences consiste à positionner les items d'après un niveau d'expertise donné à titre indicatif (Figure 58). Nous formulons d'abord l'hypothèse

que les compétences issues des entretiens permettent à des étudiants d'atteindre un niveau «Compétent». Nous mettons d'autre part à profit l'apport de **Lawson (2004)** sur les étapes d'acquisition de l'expertise en conception (cf. 1.2.3). Nous gardons cependant à l'esprit que ces étapes, issues d'une vision de psychologie cognitive, sont plutôt adaptées à une pratique individuelle de la conception. Par conséquent des adaptations sont nécessaires dans le cas d'une pratique multidisciplinaire d'éco-conception.

Pour le novice, il s'agit d'acquérir le vocabulaire et les notions de base de l'éco-conception: cycle de vie, critères d'impacts, Unité Fonctionnelle, acteurs de la chaîne de valeur...De plus, une recherche guidée d'éco-solutions peut déjà être envisagée par des novices d'après nos résultats empiriques.

Pour le débutant il s'agit de se constituer un répertoire varié d'éco-produits grâce à des documents de synthèse (comme des éco-profilés) ou grâce à des interventions industrielles illustrées. Une utilisation encadrée de guides méthodologiques et une mise en œuvre d'évaluation environnementale à un ou deux critères est praticable à ce niveau. L'appréhension de la notion de parties prenantes peut s'opérer par le biais de jeux sérieux (comme par exemple B to Green).

Pour **le praticien compétent**, les compétences d'éco-conception se structurent grâce à des «principes directeurs» qui représentent en fait des «valeurs et priorités» valables dans le contexte du projet selon **Lawson (2004)**. Une déclinaison en éco-conception peut en être la notion de stratégie environnementale (ou stratégie de Développement Durable) à définir spécifiquement dans le contexte du produit et de l'entreprise.

Pour un expert, il est caractéristique de savoir "reconnaître des situations sans effort" (**Lawson, 2004**). Cela peut se traduire par une capacité d'identification des critères d'impacts les plus pertinents (et de leurs conflits) pour un projet sans avoir recours à une longue phase d'analyse préalable. Cette conduite a d'ailleurs été identifiée chez certains participants du groupe SIMAPRO (cas BARBARAZ). Cela peut également se manifester par un choix rapide d'un ou de plusieurs outils d'éco-conception parfaitement adaptés au contexte du projet, ou la recherche efficaces d'informations environnementales pertinentes.

Pour un master, Lawson fait remarquer le recours à des «astuces et schémas de résolution» en conception (Lawson, 2004). La transposition à l'éco-conception nous semble délicate. Nous proposons de mettre en avant à ce niveau une capacité du master à avoir **un regard critique** sur le processus: conscience et anticipation des transferts de pollution ou de potentiels effets-rebonds par exemple. En second lieu, nous supposons le master capable d'une **intelligence des enjeux globaux de l'éco-conception** pour l'ensemble des parties prenantes industrielles et civiles, lui conférant une vision holiste et intégrative des problématiques. Mais cela reste un sujet pour de futures recherches car les éléments que nous avons rassemblés au cours de la thèse s'avèrent insuffisants pour décrire ce niveau d'expertise.

Expertise/ Dimension	Modélisation des Cycles de vie	Choix & Gestion de Critères	Intégration des Parties Prenantes industrielles	Intégration des Parties Prenantes civiles	Remise en cause du produit/service	Gestion du Processus
5 Master	Anticiper des transferts de pollution	Avoir un regard critique sur des valeurs d'impacts				Construire une méthode/outil dédié(e) au projet
4 Expert	Construire un scénario à cycles de vie multiples	Identifier des conflits entre critères			Créer de nouveaux modèles d'affaires	Choisir un(e) méthode/outil parmi plusieurs. Trouver des informations environnementales pertinentes
3 Compétent	Construire un cycle de vie complet (produit de complexité moyenne) Définir des frontières d'étude Scénariser la phase d'usage et de fin de vie	Choisir des critères d'impact pertinents Evaluer avec plusieurs critères sur l'ensemble du cycle de vie	Connaître les impacts importants pour les catégories de PP indus.	Comprendre les motivations des consommateurs	Comprendre les implications des technologies sur les impacts	Mettre au point une stratégie adaptée et hiérarchiser Comparer plusieurs méthodes/outils Utiliser des informations environnementales. Construire un scénario éco-fonctionnel
2 Débutant	Construire un cycle de vie complet (produit simple*)	Evaluer avec 1 ou 2 critères techniques sur une ou plusieurs étapes du cycle de Vie	Analyser les PP** industrielles impliquées sur un projet donné	Analyser les PP** civiles impliquées sur un projet donné	Identifier les axes d'amélioration Proposer des solutions à niveaux de remise en cause croissants	Appliquer une méthode étape par étape Connaître les typologies produits Faire un bilan initial
1 Novice	Connaître la notion de Cycle de vie Lire un cycle de vie Démonter un produit	Connaître les critères d'impacts techniques, environnementaux, Développement Durable	Connaître les acteurs de la chaîne de valeur produit	Connaître les catégories de PP** civiles	Connaître les niveaux de remise en cause produit/systèmes (exemples)	Appliquer une stratégie pour rechercher des solutions Améliorer la fin de vie
0	* 2 à 5 composants; ** PP: Parties Prenantes					

Figure 58: Compétences et expertise en éco-conception

5. Conclusions et perspectives

Nous abordons dans cette partie la contribution de ce travail à l'intégration de la dimension environnementale dans la pratique de la conception, dans le cadre d'une formation en ingénierie de conception. Le premier apport réside dans le mode de cadrage de l'activité d'éco-conception, que nous avons formalisé à l'aide d'un référentiel multi-niveaux à six dimensions.

Nous nous inscrivons dans une perspective de création de connaissances environnementales grâce à une "*trajectoire méthodologique*" (Reyes, 2007), jugée pertinente dans un contexte d'apprentissage académique. Du référentiel défini au paragraphe 3.2, découle un protocole de caractérisation de plusieurs outils d'éco-conception existants. Puis nous mettons à jour un ensemble de compétences d'éco-conception par l'observation de groupes mettant en oeuvre plusieurs outils d'éco-conception.

Notre problématique a mis en évidence plusieurs difficultés identifiées jusqu'à présent en milieu industriel, et dont on suppose également l'existence en milieu académique. Celles-ci sont liées à: (1) la complexité de la dimension environnementale pour les concepteurs; (2) la difficulté d'intégration de cette dimension par les différents acteurs du processus de développement de produits; (3) la multiplicité des supports méthodologiques existants en éco-conception. Nous défendons l'idée qu'avant de pouvoir pratiquer efficacement l'éco-conception en industrie, les ingénieurs doivent y être formés au cours de leur cursus d'apprentissage en conception. Il nous paraît alors nécessaire de formaliser ce que sont les bonnes pratiques de l'éco-conception.

La réponse à cette problématique consiste dans un premier temps à caractériser les thématiques qui sont abordées lors de la pratique de l'éco-conception. Nous avons ainsi cherché à définir les dimensions pertinentes dans un cursus d'apprentissage de l'éco-conception. Dans un second temps, nous avons identifié l'influence de l'expertise sur les pratiques de l'éco-conception, notamment sur la gestion du processus d'éco-conception. Cela nous a amené à poser les bases de compétences d'éco-conception que l'on a déclinées sur les dimensions retenues.

5.1 Apports de la recherche

5.1.1 Premier apport: un référentiel d'éco-conception utilisable en formation

Le premier apport de cette thèse concerne la proposition d'un référentiel complet d'éco-conception utilisable dans le cadre de la formation. Ce référentiel permet d'envisager une «trajectoire méthodologique» d'intégration de la dimension environnementale (**Reyes; 2007**). En effet, la trajectoire telle que nous l'envisageons en formation est centrée sur la notion d'activité supportée par des outils, et dans une moindre mesure sur des prises de décisions ou des transferts d'informations. D'autre part, nous élargissons la trajectoire méthodologique pour montrer les articulations et itérations entre les phases d'amélioration des produits ou services et les phases d'évaluation environnementale. L'objet du référentiel est de montrer de manière condensée et compréhensible en quoi l'activité d'éco-conception est **multi-étapes, multi-critères et multi-acteurs**. Pour cela le référentiel se décline en plusieurs dimensions associées à des échelles (ou niveaux) d'appréhension variables:

- Dimensions associées au processus de développement de produits: prise en considération de critères et de cycles de vie;
- Dimensions liées à la chaîne de valeurs et à ses acteurs, qu'ils appartiennent à la sphère industrielle ou à la sphère civile;
- Dimensions liées au contexte de développement des produits: niveau de remise en cause envisagé et étapes du processus d'éco-conception.

L'ensemble de ces dimensions semblent avoir toute leur place dans les cursus de formation à l'éco-conception, d'après les retours des responsables de formation que nous avons pu recueillir.

Dans la continuité des travaux de **Jacqueson (2002)** et de (**Reyes, 2007**), nous pensons que, s'il est nécessaire de progresser globalement suivant plusieurs directions, rien n'est imposé *a priori* sur l'ordre ou la simultanéité des dimensions à considérer. La force de la proposition

est à notre sens de montrer la diversité des chemins à emprunter, en suggérant comment se repérer à l'aide de thématiques détaillées. Nous nous situons volontairement dans une perspective de Développement Durable grâce à la notion de parties prenantes, et pensons donc faire une proposition à mi-chemin entre un référentiel d'éco-conception et de sustainable design.

Nous pouvons à présent spécifier les fonctions potentielles du référentiel d'éco-conception d'après les contextes d'usage envisagés.

- Dans un contexte d'apprentissage en entreprise, le référentiel peut permettre de faire un état des lieux initial de la maturité d'une équipe en éco-conception, puis de construire une feuille de route de progression à court, moyen et long terme.
- Le référentiel peut permettre de choisir une méthode ou un outil parmi un ensemble d'outils préalablement caractérisés à l'aide des dimensions et niveaux.
- Dans le cadre de la création d'un outil, le référentiel pourra servir à identifier une zone de manque méthodologique.
- Dans le cadre du montage d'une formation à l'éco-conception, il servira à assurer une cohérence, un équilibre et une progressivité des modules de formation.

5.1.2 Second apport: une clarification des compétences de l'éco-concepteur

L'objet de ce second apport est de clarifier et d'organiser des connaissances d'éco-conception encore émergentes. Nous avons choisi une double structuration des briques de connaissances suivant un axe thématique (grâce au référentiel) et suivant un axe d'expertise. Les connaissances ainsi organisées deviennent des compétences d'éco-conception (**Brunel, 2008**). Cette première étape de formulation des compétences est issue d'une part des séances d'observation et d'autre des retours des responsables de formation.

De l'observation comparative entre novices et experts, nous retenons que, comme en conception, la capacité de mettre au point une stratégie environnementale s'acquiert avec l'expérience. Il en va de même pour la définition de scénarios éco-fonctionnels permettant d'initier une démarche d'évaluation environnementale.

Des entretiens avec les responsables de formation il est à retenir que, si la pratique de l'éco-conception s'appuie sur une activité incontournable d'évaluation environnementale, elle est loin de s'y résumer. La perception de la globalité du processus est un élément-clé à transmettre: articulation entre évaluation et modification de la définition du produit ou service, variabilité des périmètres de remise en cause, communication environnementale, recherche d'informations pertinentes...

5.2 Limites et perspectives de recherche

Pour aller dans le sens de **Schön (1983)**, le regard réflexif que nous souhaitons porter sur l'approche de recherche constitue un maillon essentiel de ce travail. Nous évoquons trois sources de limitations: l'approche expérimentale, la formulation du référentiel d'éco-conception et des compétences de l'éco-concepteur.

5.2.1 Approche expérimentale

Les limites de l'observation d'un nombre limité de groupes («small scale experiment») ont été clairement énoncées par **Cash et al. (2012)** et rappelées au paragraphe 3.3.1. De toute évidence, nous sommes confrontés à ces limites, qui affectent notamment le caractère généralisable, et donc la validité externe des résultats présentés. Nous avons néanmoins veillé, de plus en plus attentivement au fil de l'avancement des travaux, à soigner la description et la réalisation des montages expérimentaux (profil des participants, déroulement, variables, moyens d'acquisition et d'analyse...). Cela nous permet donc de garantir la reproductibilité des protocoles, dont on a rappelé la contribution à la rigueur scientifique de l'approche.

Les limites de l'analyse de protocole mise en œuvre sur le cas BARBARAZ se trouvent dans l'apparente rigueur des résultats quantitatifs obtenus, et par rapport auxquels il convient de rester prudent. **Cross et al. (1996)** résumant bien l'ambivalence de cette approche à cheval entre les sciences pour l'ingénieur et les sciences sociales: «*Protocol analysis is somewhere in the middle between the 'hard' experimental methods of the natural sciences and the 'weaker', purely observational methods of the social sciences*». Il est donc de notre responsabilité de chercheur de pratiquer, autant que possible, une triangulation des approches expérimentales.

Enfin, nous avons choisi de mener des investigations expérimentales à la manière de certaines études de recherche en conception. Cela nous a d'abord conduit à mettre en œuvre l'analyse de protocole, dont on a pu apprécier l'intérêt mais aussi la lourdeur d'exploitation (**Cross et al., 1996; Ahmed et al., 2003**). Puis, sur le même modèle de test, nous avons allégé le mode de restitution des données, en mettant au premier plan les «traces» de l'activité d'éco-conception, et au second plan les échanges verbaux entre participants. Nous nous trouvons face au dilemme d'un *juste nécessaire expérimental* qui permette le meilleur compromis entre plusieurs facteurs: niveau de détail et de pertinence des résultats; temps consacré à l'expérimentation par les participants; temps de préparation et d'exploitation des données pour le chercheur; budget et moyens matériels requis. Ceci constitue à nos yeux un champ d'investigation à ne pas négliger dans de futurs travaux.

5.2.2 Référentiel proposé

Au cours de cette thèse, nous avons proposé et partiellement validé un référentiel d'éco-conception à plusieurs dimensions et niveaux. Il nous paraît impératif de poursuivre ce travail de validation et d'amélioration itérative en consultant (1) des étudiants en cours de formation doctorale en France; (2) des responsables de formation à l'éco-conception au plan international, ce qui n'a pas été possible dans le temps limité de la thèse.

Lors de l'utilisation du référentiel, nous avons volontairement exploré les dimensions de manière quasi-indépendante. Or les relations de dépendance entre dimensions existent du fait de la nature complexe du sujet. Cela peut ouvrir des perspectives de travaux complémentaires prenant en compte la combinaison des dimensions, comme sur le cas MOBILITE en cours d'analyse.

5.2.3 Formalisation des compétences

La consolidation des premiers résultats obtenus sur les compétences en éco-conception nécessite le développement d'expérimentations additionnelles avec d'autres sujets, en particulier «in vivo» (par un projet réel en milieu industriel ou un projet d'éco-conception dans un module académique).

Pour formaliser un savoir en émergence, nous avons fait le choix simplificateur de projeter des éléments de compétence d'éco-conception sur une échelle linéaire d'expertise. Or nous avons pleine conscience du fait que la formation à l'éco-conception dans une perspective durable se heurte à l'écueil de la complexité. Tout comme en conception, la formation à l'éco-conception «*ne peut être perçue comme une liste d'acquisitions linéaires à construire dont la somme égalerait le tout*» (Brunel, 2008).

Enfin la question du choix et de la mise en œuvre d'une **évaluation environnementale pertinente en phase de développement conceptuel** nous paraît récurrente et irrésolue. Elle a été récemment soulevée par Tyl (2011) concernant l'évaluation de concepts d'éco-innovation, et par Cluzel et al. (2012) dans le cas de projets éco-innovants pour des systèmes complexes. En effet, les indicateurs environnementaux choisis ne confèrent pas une sensibilité suffisante à l'évaluation des projets, qui ne peuvent être discriminés au plan environnemental de ce fait. Tout comme Tyl (2011), nous avons constaté une réelle dispersion dans la perception de la performance environnementale des concepts générés lors de l'expérimentation BARBARAZ. Cela nous conduit à formuler conjointement une nouvelle question de recherche: «*Comment définir des critères d'évaluation environnementale représentatifs et fiables pour sélectionner les concepts les plus pertinents en phase amont du processus de conception de produit?*». A cet effet, un nouveau protocole de test a été mis au point et réalisé en juin 2011. Après avoir redessiné et décrit de manière homogène un échantillon de concepts (jugés les plus dispersifs lors de la première évaluation), nous avons testé plusieurs facteurs potentiels d'influence sur l'évaluation: identification de la phase où apparaît la réduction d'impact, de la catégorie d'impact environnemental, risque de transfert d'impact, comportement de l'utilisateur, importance de la réduction d'impact (relativement à un cas de référence). Les résultats, en cours d'exploitation, devraient permettre d'apporter des éléments de réponse à cette question de la fiabilité d'une évaluation environnementale lorsque les concepts sont à l'état d'ébauche.

A court terme, nous envisageons également de consolider les résultats de l'expérimentation MOBILITE, pour laquelle le point de focalisation est le choix et la gestion des critères d'évaluation environnementale dans un groupe multidisciplinaire de conception.

5.3 Perspectives de formation à l'éco-conception à l'UTC

Nous sommes engagés dans une perspective d'évolution de la législation environnementale et, plus largement, des mécanismes de production et de consommation. L'évolution des pratiques professionnelles des concepteurs vers plus de respect des contraintes d'environnement est une condition nécessaire à cette évolution. Afin d'accompagner le changement, il est aujourd'hui nécessaire d'assurer aux concepteurs une formation initiale de qualité dans le domaine de l'éco-conception. La formation doit se situer à un **niveau général de sensibilisation** aux problématiques environnementales et à un **niveau plus spécialisé** correspondant par exemple à la capacité de mener une évaluation environnementale pertinente **(Ritzen, 2000, p. 42)**.

A l'occasion de la conférence des Nations Unies sur le Développement Durable (RIO +20), l'UTC s'est engagée à mettre en œuvre des pratiques durables en son sein, notamment par le biais de la formation. Nous considérons que l'intégration de l'éco-conception au cursus de formation des ingénieurs mécaniciens participe opérationnellement à cette prise de position. Pour répondre à la question «*Comment intégrer l'éco-conception au cursus de formation des ingénieurs mécaniciens de l'UTC*», l'on peut considérer deux visions complémentaires: (1) ajouter des éléments introductifs à l'éco-conception à des modules existants du cursus d'ingénierie mécanique; (2) ajouter un module d'éco-conception autonome plus approfondi au cursus. Nous pensons que ces deux options peuvent être avantageusement mises en œuvre dans notre contexte. La première vision est déjà d'actualité depuis plusieurs années. En effet, des éléments parcellaires de formation à l'éco-conception sont présents dans le cursus d'ingénierie mécanique de l'UTC depuis 2007. Ce travail de thèse devrait nous permettre, très prochainement, de renforcer la présence de l'éco-conception grâce à un module dédié dont nous donnons les grandes lignes directrices.

5.3.1 Une initiation à l'éco-conception au cœur de plusieurs modules cibles d'enseignement

A ce jour, quelques notions d'éco-conception apparaissent dans deux modules de conception (conception mécanique TN12 et conception intégrée en apprentissage TMI08), deux modules de design industriel (initiation au design DI01 et qualité perçue des produits DI06) et deux modules transverses de Développement Durable (DD01) et d'Analyse de la Valeur (DI05). Chacun des modules concernés comprend un cours d'initiation à l'éco-conception présentant les notions fondamentales ainsi que des exemples adaptés au module-cible. Puis les exigences d'éco-conception sont intégrées par les étudiants à l'occasion d'un projet de conception ou de design industriel. L'évaluation environnementale est mise en œuvre dans deux modules: qualitativement en design industriel (DI01); quantitativement à l'aide d'un indicateur mono-critère de contenu énergétique en conception mécanique (TN12).

5.3.2 Vers un module intégrateur d'éco-conception

Les trois angles d'attaque (*dimensions, méthodes/outils et compétences*) que nous avons mis en évidence constituent des points de référence pour la construction d'un module de formation à l'éco-conception destiné à de futurs ingénieurs en mécanique.

- **Approche multi-dimensionnelle de l'éco-conception**

Les six dimensions caractéristiques de l'éco-conception que nous avons évoquées vont servir de lignes directrices à la construction de la formation. Une attention particulière sera portée à des approches qui semblent encore peu présentes dans les cursus de formation examinés: démarches centrées sur l'utilisateur et plus généralement sur les parties prenantes.

- **Mobilisation d'outils d'éco-conception adaptés**

Chaque item de formation, lui même relié à une ou plusieurs dimensions, sera outillé de la façon la plus judicieuse possible en considérant l'adéquation des outils existants avec les dimensions considérés (voir ANNEXE 3).

- **Prise en compte du niveau et de la formation initiale des étudiants**

Les observations d'étudiants et d'experts sur les cas ASPI et BARBARAZ se révèlent précieux à cet égard. Nous suggérons d'initier l'approche avec des novices par des cycles itératifs de recherche de solutions et d'évaluation environnementale contrairement aux préconisations des guides. Nous envisageons d'accompagner la scénarisation éco-fonctionnelle avec des schémas et des critères d'évaluation abordables rapidement par des novices. Cela servira de base de la définition d'une Unité Fonctionnelle pertinente. D'autre part, dans la prolongation de la pensée de **Lawson (2004)**, nous pensons créer des répertoires d'éco-produits réels et de leurs indicateurs d'impacts associés, afin d'induire des stratégies par typologies de produits.

5.4 Du concepteur à l'éco-concepteur: continuité ou rupture?

De cette étude émerge une interrogation quant à la mise en œuvre de formation à l'éco-conception pour des concepteurs. **Est-il suffisant de disposer d'un complément de formation à l'environnement dans les cursus d'ingénierie de conception pour devenir éco-concepteur? Ou l'éco-concepteur doit-il être formé grâce à de nouveaux cursus dédiés, avec des méthodes et des outils radicalement différents de ceux qu'il utilise à l'heure actuelle ?**

Il nous semble qu'un élément de réponse découle du niveau d'intervention attendu de la part des concepteurs en terme d'intégration de l'environnement. Les ingénieurs sont avant tout des professionnels en charge de résolution de problèmes, ce qu'ils font le plus souvent de manière quantitative (**Allenby, Allen & Davidson, 2007**). Cela semble bien coïncider avec une pratique de DfX ou d'éco-conception, où la place d'une évaluation environnementale chiffrée reste essentielle. Ces approches répondent à un besoin industriel actuel de reconception des produits qui couvre environ 80% de l'activité. Dans ce cas, le concepteur devient «reconcepteur» dans un périmètre élargi qui inclut l'entreprise, la chaîne d'approvisionnement et de fin de vie.

Néanmoins, dans une perspective de Développement Durable, on imagine ce type d'approche insuffisant pour atteindre un facteur 10 ou 20. Il incombe alors au concepteur et au groupe

projet de savoir poser les problématiques environnementales sous de nouvelles formes. Cela demande à notre sens davantage de pratiques multidisciplinaires, de connaissances en environnement, mais aussi en éthique, en sciences sociales et de gestion pour développer produits, services et modèles d'affaires associés. Certains cursus d'ingénierie comme celui de l'Ecole Centrale de Paris sont en cours de mutation, laissant à penser que de nouveaux profils d'ingénieurs contemporains généralistes, plus conscients des enjeux sociétaux liés à la production et à la consommation, sont en émergence.

Nous pensons donc qu'une formation d'éco-conception qui apporte des modifications incrémentales aux produits existants est compatible avec les cursus de formation actuelle en ingénierie de conception. En revanche le passage à une éco-conception plus radicale nécessite sans doute de mettre sur pied de nouveaux cursus de formation (master et ingénieur) pour permettre aux étudiants d'appréhender la complexité des enjeux actuels du Développement Durable en conception de produits et services. Mais cela sera-t-il suffisant pour faire évoluer en profondeur les pratiques industrielles au Nord comme au Sud?

En tant que chercheur, nous avons la volonté de contribuer à la construction d'une «*nouvelle connaissance en conception*» (**Manzini, 2009**) afin de former la génération de concepteurs conscients des défis à relever pour une société plus durable.

Bibliographie

- [1] **(Abele et al., 2005)** Abele E., Anderl R., Birkhofer H. (2005). Environmentally-Friendly Product Development-Methods and Tools. London: Springer-Verlag.
- [2] **(Abrassart & Aggeri, 2002)** Abrassart C., Aggeri F. (2002). La naissance de l'éco-conception-Du Cycle de vie du produit au management environnemental « produit ». Annales des Mines, pp 41-63.
- [3] **(ADEME, 2010)** ADEME (2010). Première étude sur le déploiement de l'éco-conception en France et sur les attentes et besoins des entreprises par BVA pour l'ADEME-Synthèse de l'étude de marché pour une « boîte à outils éco-conception », mai 2010. [en ligne] Disponible sur <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=12923>. Consulté le 10 avril 2011.
- [4] **(AFNOR, 1997)** Norme NF EN ISO 14040:1997 (1997). Management environnemental. Analyse de Cycle de Vie-Principes et cadre. Genève: ISO.
- [5] **(AFNOR, 1998)** Norme FD X 30-310 (1998). Management environnemental. Prise en compte de l'environnement dans la conception des produits. Principes généraux et application. Paris: AFNOR.
- [6] **(AFNOR, 2003)** Norme XP ISO/TR 14062 (2003). Management Environnemental, Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit. Rapport Technique. Genève: ISO.
- [7] **(AFNOR, 2008)** AFNOR (2008). Panorama des initiatives françaises dans le domaine de l'éco-conception, juin 2008. Paris: AFNOR.
- [8] **(AFNOR, 2009)** Norme expérimentale XP E01-005 (2009) Produits Mécaniques-Méthodologie d'éco-conception. Paris: AFNOR.
- [9] **(AFNOR, 2010)** Norme ISO 26000: 2010 (2010). Lignes directrices relatives à la responsabilité sociétale. ISO, novembre 2010.
- [10] **(Ahmed et al., 2003)** Ahmed, S. (2003). Understanding the differences between how novice and experienced designers approach design tasks. Research in Engineering Design 14(1), pp 1-11.
- [11] **(Akermark, 2005)** Akermark A.M. (2005). The Crucial Role of the Designer in EcoDesign. PhD Thesis. Royal Institute of technology-KTH, Stockholm.

- [12] **(Allenby, Allen & Davidson, 2007)** Allenby B.R., Allen D.T., Davidson C.I. (2007). Teaching Sustainable Design. *Industrial Ecology in North America*, 11(1), pp 8-10.
- [13] **(Amaya et al., 2010)** Amaya J., Zwolinski P., Brissaud D. (2010). Environmental benefits of parts remanufacturing: the truck injector case. 17th CIRP International Conference on LCE, Hefei, ANHUI, China.
- [14] **(Andriankaja, 2011)** Andriankaja H. (2011). Vers une organisation éco-concevante: opérationnalisation de l'analyse de cycle de vie en conception par une simplification basée sur une typologie en famille de produits, Thèse de Doctorat. Ecole Centrale de Paris.
- [15] **(Argyris & Schon, 2002)** Argyris C., Schon D. (1996). Apprentissage organisationnel. Théorie, Méthode, Pratique. Bruxelles: De Boeck.
- [16] **(Auricchio et al. 2010)** Auricchio M., Bracewell R., & Wallace K. (2010). Understanding how the information requests of aerospace engineering designers influence information-seeking behaviour. *Journal of Engineering Design* 22(6), pp 707-730.
- [17] **(Bakker, 1995)** Bakker C. (1995). Environmental Information for Industrial Designers. PhD Thesis. Delft University of Technology.
- [18] **(Baumann et al., 2002)** Baumann, H., Boons, F., Bragd, A. (2002). Mapping the green product development field: engineering, policy and business perspectives. *Journal of Cleaner Production* 10(5), pp 409-425.
- [19] **(Bhamra, 2004)** Bhamra T.A. (2004). Ecodesign: the search for new strategies in product development. *Journal of Engineering Manufacture* 218(5), pp 557-569.
- [20] **(Bhamra & Lofthouse, 2007)** Bhamra T.A., Lofthouse V.A. (2007). Design for Sustainability: a practical Approach. Aldershot: Gower Publishing Limited.
- [21] **(Blessing & Chakrabarti, 2009)** Blessing L., Chakrabarti A. (2009). DRM, A Design Research Methodology. London: Springer Verlag.
- [22] **(Boeglin et al., 2006)** Boeglin N., Clément D., & Guignard S. (2006). Changer d'ère... pour construire une nouvelle relation à l'environnement. Paris: Le Pommier/Cité des Sciences et de l'Industrie.
- [23] **(Boks, 2006)** Boks C. (2006). The soft side of eco-design. *Journal of Cleaner Production* 14(15-16), pp 1346-1356.
- [24] **(Bovea & Peres-Beliz, 2012)** Bovea M.D., Peres-Belis V. (2012). A Taxonomy of eco-design tools for integrating environmental requirements into the product design process. *Journal of Cleaner Production* 20(1), pp 61-71.

- [25] **(Bras, 1996)** Bras B. (1996). Incorporating environmental issues in product design and realization. *UNEP Industry Environment* 20(1-2), pp 7-13.
- [26] **(Brezet, 1997)** Brezet H. (1997). Dynamics in ecodesign practice. *UNEP Industry Environment* 20(1-2), pp 21-24.
- [27] **(Brezet & Van Hemel, 1997)** Brezet J.C., Van Hemel C. (1997). *Eco-design-A promising approach to sustainable production and consumption*. Paris: UNEP United Nations Publications.
- [28] **(Brunel, 2008)** Brunel S. Etude des activités collaboratives de conception en tant que situation d'apprentissage: application à l'ingénierie des produits et à l'ingénierie didactique. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux 1.
- [29] **(Butel-Bellini & Janin, 2011)** Butel-Bellini B., Janin M. (2011). *Eco-conception: état de l'art des outils disponibles*. Techniques de l'Ingénieur, Traité Environnement G6 010, pp 1-12.
- [30] **(Brundtland, 1987)** Brundtland, G. (1987). *Our common future: World Commission on Environment and development report*. Oxford: Oxford University Press.
- [31] **(Cash et al., 2012)** Cash P., Elias E., Deconinck E., Culley S. (2012). Methodological insights from a rigorous small scale design experiment. *Design Studies*, 33(2), pp 208-235.
- [32] **(CCI St Etienne & IDP Montréal, 2009)** CCI St Etienne, IDP Montréal (2009). *L'éco-conception : quels retours économiques pour l'entreprise?*. [en ligne] Disponible sur <http://www.cirano.qc.ca/pdf/publication/2009s-09.pdf>. Consulté le 15 janvier 2011.
- [33] **(Chai & Xiao, 2012)** Chai K.H., Xiao X. (2012). Understanding Design Research; a bibliometric analysis of *Design Studies* (1996-2010). *Design Studies* 33(1), pp 24-43.
- [34] **(Charter & Chick, 1997)** Charter M., Chick A. (1997). Welcome to the first issue of the *Journal of Sustainable Product Design*. *Journal of Sustainable Product Design* 1(1), pp 5-6.
- [35] **(Choulier, 2008)** Choulier, D. (2008). *Comprendre l'activité de conception*. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
- [36] **(Cluzel et al. 2012)** Cluzel F., Yannou B., Millet D., Leroy Y. (2012). Identification and selection of eco-innovative R&D projects in complex systems industries. *International Design Conference Design 2012, Dubrovnik, Croatia, May 21-24*.

- [37] **(Cohen, 1960)** Cohen J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*. 20, pp. 27-46.
- [38] **(Collado & Ostad-Ahmad-Ghorabi, 2010)** Collado D., Ostad-Ahmad-Ghorabi H. (2010). Influence of environmental information on creativity. *Design Studies* 31(5), pp 479-498.
- [39] **(Cowan, 2001)** Cowan N. (2001). The magical number 4 in short term memory: a reconsideration of mental storage capacity. *Behavioural and Brain Sciences* 24(1), pp 87-114.
- [40] **(CREDOC, 2012)** CREDOC (2012). Etude sur les attitudes et comportements des français en matière d'environnement. Etude réalisée à la demande de l'ADEME, édition 2011. Janvier 2012. [en ligne] <http://www.credoc.fr/pdf/Rapp/R279.pdf>. Consulté le 10/04/12.
- [41] **(Cross et al., 1996)** Cross N., Christiaans H., Dorst K. (1996). *Analysing Design Activity*. Chichester: John Wiley.
- [42] **(Cross, 2004)** Cross N. (2004). Expertise in design: an overview. *Design Studies* 25(5), pp 427-441.
- [43] **(Cross, 2008)** Cross N. ed (2008). *Engineering Design Methods-Strategies for Product Design*. 4th edition. Chichester: John Wiley.
- [44] **(Crul & Diehl, 2009)** Crul, M., & Diehl, J. C., eds. (2009). *Design for sustainability-A step-by-step approach*. Paris: UNEP.
- [45] **(De Singly, 2005)** De Singly F. (2005). *L'enquête et ses méthodes: le questionnaire*. Paris: Armand Colin.
- [46] **(De Wulf, 2003)** De Wulf W. (2003), *A ProActive Approach to EcoDesign: Methods and Tools*. PhD Thesis. Katolische Universitat Leuven.
- [47] **(Diehl & Brezet, 2005)** Diehl J.C., Brezet J.C. (2005). International ecodesign education: personalized knowledge transfer. *International Conference on Engineering Design, ICED'05*, 15-18 August, Melbourne, Australia.
- [48] **(Dorst, 2001)** Dorst K. (2001). Creativity in the design process: co-evolution of problem-solution. *Design Studies* 22(5), pp 425-437.
- [49] **(Dorst, 2008)** Dorst, K. (2008). Design research: a revolution-waiting-to-happen. *Design Studies*, 29(1), pp 4-11.

- [50] **(Dreux-Gerphagnon & Haoues, 2011)** Dreux-Gerphagnon B., Haoues N. (2011). Considering the Social Dimension in Environmental Design 18th CIRP International Conference on LCE, Braunschweig, Germany, May 2nd-4th.
- [51] **(ECOFAIRE, 2008)** ECOFAIRE l'OUTIL (2008). Issu du programme ECOFAIRE piloté par la SEM régionale des Pays de Loire et financé par l'Etat, la Région Pays de Loire et l'ADEME.
- [52] **(Eder, 2009)** Eder W.E. (2009). Design engineering and needs for methodology. International Conference on Engineering Design, ICED'09, 25-28 August. Palo Alto, CA, USA.
- [53] **(Factor 10 Club, 1995)** Factor 10 Club (1995). Camouls declaration. Wuppertal: Wuppertal Institut.
- [54] **(Fargnoli & Kimura, 2006)** Fargnoli, M., Kimura, F. (2006). Sustainable Design of Modern Industrial Products. In International Conference of Life Cycle Engineering, LCE'06, Leuven.
- [55] **(Fuad-Luke, 2002)** Fuad-Luke, A. (2002). The eco-design handbook: a complete sourcebook for the home and office. London: Thames & Hudson.
- [56] **(Fussler & James, 1996)** Fussler C., James P. (1996). Driving Eco Innovation-A breakthrough discipline for innovation and sustainability. Pitman Publishing, Pearson Professional Ltd.
- [57] **(Gero, 1990)** Gero J.S. (1990). Design Prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design. AI Magazine 11(4), pp 26-36.
- [58] **(Gero & Mac Neill, 1998)** Gero, J.S., Mac Neill T. (1998). An approach to analysis of design protocol. Design Studies 19(1), pp 21-61.
- [59] **(Gero & Kannengiesser, 2004)** Gero J.S., Kannengiesser U. (2004). The situated function-behaviour-structure framework. Design Studies 25(4), pp 373-391.
- [60] **(Grisel & Osset, 2004)** Grisel L., Osset P. (2004). L'analyse du cycle de Vie d'un produit ou d'un service. Applications et mise en pratique. Paris: AFNOR.
- [61] **(Gupta et al., 2011)** Gupta A., Jayal A.D., Chimienti M., Jawahir S. A Total Life-Cycle Approach towards Developing Product Metrics for Sustainable Manufacturing. 18th CIRP International Conference on LCE, Braunschweig, Germany, May 2nd-4th.
- [62] **(Hallstedt, 2008)** Hallstedt J. (2008). A foundation for Sustainable Product

Development. PhD Thesis. Blekinge University of Technology.

- [63] **(Hatchuel & Weil, 2003)** Hatchuel A., Weil B. (2003). A new approach of innovative design: an introduction to C-K theory. International Conference on Engineering Design, ICED'03, 17-21 August. Stockholm, Sweden.
- [64] **(Hemel, 1998)** Van Hemel, C. (1998). Ecodesign empirically explored-Design for Environment in Dutch small and medium sized enterprises. Design for Sustainability. Delft University of Technology.
- [65] **(Hicks et al., 2009)** Hicks B., Mc Alpine H., Torlind P., Storga M., Blanco E., Montegna E., Cantamessa M. An intelligent design environment - Overcoming fundamental barriers to realizing a step change in design performance & innovation. International Conference on Engineering Design, ICED'09, 25-28 August. Palo Alto, CA, USA.
- [66] **(Ho, 2001)** Ho C.H. (2001). Some phenomena of problem decomposition strategy for design thinking: differences between novices and experts. Design Studies 22(1), pp. 27-45.
- [67] **(Horschorner & Finnveden, 2003)** Horschorner E., Finnveden G. (2003). Evaluation of two simplified Life Cycle Assessment methods. The International Journal of Life Cycle Assessment, 8(3), pp. 119-128.
- [68] **(Jacqueson, 2002)** Jacqueson L. (2002). Intégration de l'environnement en entreprise : Proposition d'un outil de pilotage du processus de création de connaissances environnementales. Thèse de doctorat. ENSAM Paris.
- [69] **(Janin, 2000)** Janin M. (2000). Démarche d'éco-conception en entreprise-Un enjeu : construire la cohérence entre outils et processus. Thèse de doctorat. ENSAM Chambéry.
- [70] **(Jones et al., 2001)** Jones, E., Stanton N.A., Harrison D. (2001). Applying structured methods to Eco-innovation. An evaluation of the Product Ideas Tree Diagram. Design Studies 22(6), pp. 519-542.
- [71] **(Jones, 2003)** Jones, E. (2003). Eco-innovation: tools to facilitate early-stage workshops. PhD Thesis. Brunel University.
- [72] **(JOUE, 2000)** JOUE. Directive 2000/53/CE du Parlement Européen et du Conseil du 18 septembre 2000 relative aux véhicules hors d'usage, L 269/34, 21.10.2000.
- [73] **(JOUE, 2003a)** JOUE. Directive 2002/95/CE du Parlement Européen et du Conseil du 27 janvier 2003 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques, L 37/19, 13.2.2003.

- [74] **(JOUE, 2003b)** JOUE. Directive 2002/96/CE du Parlement Européen et du Conseil du 27 janvier 2003 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), L37/24, 13.2.2003.
- [75] **(JOUE, 2004)** JOUE. Directive 2004/12/CE du Parlement européen et du Conseil du 11 février 2004 modifiant la directive 94/62/CE relative aux emballages et aux déchets d'emballages. L 47/26, 18.2.2004.
- [76] **(JOUE, 2007)** JOUE. Règlement(CE) 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH).
- [77] **(JOUE, 2009)** JOUE. Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products.
- [78] **(Karlsson & Luttrupp C., 2006)**. Karlsson R., Luttrupp C. (2006). EcoDesign: What's happening? An overview of the subject area of EcoDesign and of the papers of this special issue. *Journal of Cleaner Production*, 14(15-16), pp 1291–1298.
- [79] **(Kazazian, 2003)** Kazazian T. (Dir.) (2003). *Design et Développement Durable : Il y aura l'âge des choses légères*. Paris: Victoires Editions.
- [80] **(Kim et al., 2009)** Kim Y.S., Sang W.L., Jung A.P., Ji Y.J. (2009). Exercises for cognitive elements of design creativity, *International Conference on Engineering Design, ICED'09*, 24-27 August. Palo Alto, CA, USA.
- [81] **(Knight & Jenkins, 2009)** Knight P., Jenkins J.O. (2009). Adapting and Applying eco-design techniques: a practitioners' perspective. *Journal of Cleaner Production*, 17(5), pp 549-558.
- [82] **(Kruger & Cross, 2006)** Kruger C., Cross N. (2006). Solution driven versus problem driven design: strategies and outcomes. *Design Studies* 27(5), pp 527-548.
- [83] **(Lagerstedt, 2003)** Lagerstedt J. (2003). *Functional and environmental factors in early phases of product development: Eco-functional Matrix*. PhD Thesis. Royal Institute of Technology-KTH, Stockholm.
- [84] **(Lahonde, 2010)** Lahonde, N. (2010). *Optimisation du processus de conception: Proposition d'un modèle de sélection des méthodes pour l'aide à la décision*. Thèse de doctorat. ENSAM Paris.

- [85] **(Lawson, 2004)** Lawson B. (2004). Schemata, gambits and precedent : some factors in design expertise. *Design Studies* 25 (5), pp 443-457.
- [86] **(Le Pochat, 2005)** Le Pochat S. (2005). Intégration de l'éco-conception dans les PME : proposition d'une méthode de savoir-faire pour la conception environnementale des produits. Thèse de Doctorat. ENSAM Chambéry.
- [87] **(Le Pochat et al., 2007)** Le Pochat S., Bertoluci G., Froelich D. (2007). Integrating ecodesign by conducting changes in SMEs. *Journal of Cleaner Production*, 15 (7), pp 671-680.
- [88] **(Lilley, 2009)** Lilley D. (2009). Design for sustainable behaviour: strategies and perceptions. *Design Studies* 30(6), pp 704-720.
- [89] **(Lindhal, 2005)** Lindhal M. (2005). Engineering designers' requirements on design for environment methods and tools. PhD Thesis. Royal Institute of Technology-KTH, Stockholm.
- [90] **(Lindhal, 2006)** Lindhal M. (2006). Engineering designers' experience of design for environment methods and tools-Requirement definitions from an interview study. *Journal of Cleaner Production* 14 (5), pp 487-496.
- [91] **(Liikanen & Perttula, 2009)** Liikanen LA., Perttula M. (2009). Exploring problem decomposition in conceptual design among novice designers. *Design Studies* 30(1), pp. 38-59.
- [92] **(Lofthouse, 2001)** Lofthouse, V. A. (2001). Facilitating ecodesign in an industrial design context An exploratory study. PhD Thesis. Cranfield University.
- [93] **(Lofthouse, 2006)** Lofthouse, V.A. (2006). Ecodesign tools for designers: defining the requirements. *Journal of Cleaner Production* 14(15-16), pp 1386-1395.
- [94] **(Luttrupp & Lagerstedt, 2006)** Luttrupp C., Largertedt J. (2008). Eco Design and the Ten Golden Rules : generic advice for merging environmental aspects into product development. *Journal of Cleaner Production* 14(15-16), pp 1396-1408.
- [95] **(Manzini, 2009)** Manzini E. (2009). Viewpoint-New Design Knowledge. *Design Studies* 30(1), pp 4-12.
- [96] **(Mc Aloone et al., 2010)** Mc Aloone T.C., Mougard K., Restrepo J., Knudsen S. (2010). Eco-innovation in the value chain. International Design Conference Design 2010, Dubrovnik, Croatia, May 17-20.
- [97] **(Mc Aloone & Bey, 2009)** Mc Aloone T.C., Bey N. (2009). Environmental improvement through product development. [en ligne] Disponible sur

<http://www.ipu.dk/English/IPU-Product-Development/Publications/Guide-til-miljoefforbedringer-gennem-produktudvikling.aspx>. Consulté le 23 février 2010.

- [98] **(Mc Donnell & Lloyd, 2009)** Mc Donnell, J., Lloyd, P. (2009). About: Designing-Analysing Design Meetings. Netherlands: CRC Press Balkema.
- [99] **(Mc Donough & Braungart, 2002)** McDonough, W., Braungart, M. (2002). Cradle to cradle: Remaking the way we make things. New York: North Point Press.
- [100] **(Miles & Huberman, 1994)** Miles M.B., Huberman A.M. (1994). Qualitative Data Analysis-An Expanded Source book, 2nd Ed. Beverley Hills: Sage Publications Ltd.
- [101] **(Millet et al., 2001)** Millet D., Bistagnino L, Camous R., Aoussat A. (2001). Etat des lieux des outils méthodologiques environnementaux: proposition d'une nouvelle classification basée sur les niveaux de transformation de l'entreprise. 4^{ème} Congrès International de Génie Industriel CIGI, Aix-Marseille, France.
- [102] **(Millet, 2003)** Millet D. (Dir.) (2003). Intégration de l'environnement en conception-L'entreprise et le développement durable. Paris: Hermès Lavoisier.
- [103] **(Millet et al., 2007)** 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(4), pp 335-346.
- [104] **(Neves Puglieri & Ometto, 2011)** Neves Puglieri F., Ometto R. (2011). Environmental and Operational Analysis of Ecodesign Methods Based on QFD and FMEA. 18th CIRP International Conference on LCE, Braunschweig, Germany, May 2nd-4th.
- [105] **(Nonaka & Takeuchi, 1997)** Nonaka I, Takeuchi H (1997). La Connaissance Créatrice, la dynamique de l'entreprise apprenante. Bruxelles: De Boeck.
- [106] **(Pahl et al., 2007)** Pahl G., Beitz W, Feldhusen J., Grote K.H. (2007). Engineering design-A Systematic Approach, Third Edition. London: Springer-Verlag.
- [107] **(Papanek, 1984)** Papanek V. (1984). Design for the Real World-Human, Ecology and Social Change. Second Edition. Chicago: Academy Chicago Publishers.
- [108] **(Persson, 2001)** Persson J.G. (2001). Eco-indicators in product development. Proceedings of Institution of Mechanical Engineers 215 Part B, pp 627-635.
- [109] **(Pialot et al., 2012)** Pialot O., Millet D., Tcherchian N. (2012). How to explore scenarios of multiple upgrade cycles for Sustainable Product Innovation: the "Upgrade Cycle Explorer" tool. Journal of Cleaner Production 22(1), pp 19-31.
- [110] **(Pigosso & Rozenfeld, 2011)** Pigosso D.C.A, Rozenfeld H. (2011). Proposal of an

- Ecodesign Maturity Model: supporting companies to improve Environmental Sustainability. 18th CIRP International Conference on LCE, TU Braunschweig, Germany, May 2nd-4th.
- [111] **(Prudhomme, Pourroy & Lund, 2007)** Prudhomme G., Pourroy F., Lund K. (2007). An empirical study of engineering knowledge dynamics in a design situation. *Journal of Design Research* 6 (3), pp 333-358.
- [112] **(Restrepo & Christiaans, 2004)** Restrepo J., Christiaans H. (2004). Problem Structuring and Information Access in Design. *Journal of Design Research* 4(2), pp 1551-1569.
- [113] **(Reyes, 2007)** Reyes T. (2007). L'éco-conception dans les PME: les mécanismes du Cheval de Troie méthodologique et le choix des trajectoires comme vecteurs d'intégration de l'environnement en conception. Thèse de Doctorat. Université du Sud Toulon-Var.
- [114] **(Ritzen, 2000)** Ritzen S. (2000). Integrating Environmental Aspects into Product Development-Proactive Measures. PhD Thesis. Royal Institute of Technology-KTH, Stockholm.
- [115] **(Sakao, Paulsson & Mizuyama, 2011)** Sakao T., Paulsson S., Mizuyama H. (2011). Inside a PSS Design Process-Insights through protocol analysis. International Conference in Engineering Design ICED 11, 15-18 August, Technical University of Denmark, Copenhagen.
- [116] **(Sauer et al., 2004)** Sauer J., Wiese B.S., Ruttiger B. (2004). Ecological performance of electrical consumer products: the influence of automation and information-based measures. *Applied Ergonomics* 35(1) pp 37-47.
- [117] **(Schmidt-Bleek, 1994)** Schmidt-Bleek, F. (1994). *Wieviel Umwelt Braucht der Mensch?* (How much environment does man need?). Berlin: Birkhäuser Verlag.
- [118] **(Schön, 1983)** Schön D. (1983). *The reflective practitioner. How Professionals think in action.* New-York: Basic Books.
- [119] **(Sherwin, 2000)** Sherwin C. (2000). Innovative Ecodesign-An exploratory and descriptive study of Industrial Design practice. PhD Thesis. Cranfield University.
- [120] **(Simon, 1991)** Simon H. (1991). *The Sciences of the Artificial.* Cambridge: MIT Press.
- [121] **(Stempfle & Badke-Schaub, 2002)** Stempfle J., Badke-Schaub P. (2002). Thinking in Design Teams- An Analysis of Team Communication. *Design Studies* 23(5), pp 473-496.

- [122] **(Tashakkori & Teddie, 2003)** Tashakkori A., Teddie C. (2003). Handbook of mixed methods in social and behavioural research. California: Sage Publications.
- [123] **(Telenko et al., 2008)** Telenko C., Seepersad C.C., Webber W.E. (2008). A Compilation of Design for the Environment Principles and Guidelines. ASME DETC Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference, New-York.
- [124] **(Tischner, 2001)** Tischner U. (2001). Tools for ecodesign and sustainable product design. In *Sustainable Solutions: developing products and services for the future*, pp 118-139. Eds Charter M. and Tischner U. Sheffield: Greenleaf Publishing.
- [125] **(Torlind et al., 2009)** Torlind P, Sonalkar N., Bergstrom M., Blanco E., Hicks B, Mc Alpine H. (2009). Lessons learned and future challenges for Design Observatory research. International Conference on Engineering Design, ICED'09, 25-28 August. Palo Alto, CA, USA.
- [126] **(Tyl et al., 2010)** Tyl B., Legardeur J., Millet D., Vallet F. (2010). Stimulate creative ideas for eco-innovation: an experiment to compare eco-design and creativity tools. IDMME Virtual Concept 2010, 20-22 October. Bordeaux, France.
- [127] **(Tyl, 2011)** Tyl B. (2011). L'apport de la créativité dans le processus d'éco-innovation. Proposition de l'outil EcoAsit pour favoriser l'éco-idéation de systèmes durables. Thèse de Doctorat. Université de Bordeaux 1.
- [128] **(UNEP, 1994)** UNEP Industry and Environmental Program (1994). The Prince of Wales Business Leaders Forum and Tufts University Partnership for Sustainable Development. London: The Prince of Wales Business Leaders Forum.
- [129] **(Ullman, 2009)** Ullman D.G. (2009). The Mechanical Design Process. 4th edition. New York: Mc Graw Hill.
- [130] **(Ulrich & Eppinger, 2011)** Ulrich K.T., Eppinger S.D. (2011). Product Design and Development. 5th edition. New-York: Mc Graw-Hill.
- [131] **(Valkenburg & Dorst, 1998)** Valkenburg R., Dorst K. (1998). The reflective practice of design teams. Design Studies 19(3), pp 249-271.
- [132] **(Valkenburg & Kleinsmann, 2009)** Valkenburg R., Kleinsmann M. (2009). Performing High Quality research into design practice. International Conference on Engineering Design, ICED'09, 24-27 August. Palo Alto, CA, USA.
- [133] **(Vallet, Millet & Eynard., 2009)** Vallet F., Millet D., Eynard B. (2009). Investigating the use of eco-design guides: presentation of two case studies. International Conference on Engineering Design, ICED'09, 24-27 August. Palo Alto, CA, USA.
- [134] **(Vallet, Millet & Eynard, 2011)** Vallet F., Millet D., Eynard B. (2011). Requirements

- and Features Clarifying for eco-design tools. In *Global Product Development*. Springer, A. Bernard Ed., pp 127-137. Nantes, France.
- [135] **(Vallet et al., 2011)** Vallet F., Kendira A., Millet D., Eynard B. (2011). Conception versus éco-conception, 12ème Colloque National AIP PRIMECA, Le Mont Dore, 29 mars-1er avril.
- [136] **(Vallet, Millet & Eynard, 2012)** Vallet F., Millet D., Eynard B. (2012). Understanding the need of novices in eco-design learning. 22nd CIRP Design Conference on Sustainable Product Development, Bangalore, India, 28-30 April.
- [137] **(Van Hemel, 1998)** Van Hemel C. (1998). EcoDesign empirically explored. Design for Environment in Dutch small and medium sized enterprises. PhD Thesis. TU Delft.
- [138] **(Vezzoli & Manzini, 2008)** Vezzoli, C., & Manzini, E. (2008). Design for environmental sustainability. London: Springer Verlag.
- [139] **(Visser, 2009)** Visser, W. (2009). Design: one, but in different forms. *Design Studies*, 30(3), pp 187-223.
- [140] **(Vogtländer, 2010)** Vogtländer J.G. (2010). A practical guide to LCA for student designers and business managers. Cradle to Cradle & Cradle to Grave. Delft: VSSD.
- [141] **(Von Weizsacker et al. 1997)** Von Weizsacker E., Lovins L.H., Lovins A.B. (1997). Factor Four: Doubling Wealth, Halving Resource Use. London: Earthscan.
- [142] **(White et al. 2007)** White P., St Pierre L., Belletire S. (2007). Okala course guide. Dulles, VA: IDSA.
- [143] **(Wimmer & Züst, 2003)** Wimmer W., Züst R. (2003). Ecodesign PILOT: product investigation, learning and optimization tool for sustainable product development. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Production scientifique

Colloques et Conférences Internationaux avec actes

VALLET F., MILLET D., EYNARD B. (2012). Understanding the need of novices in eco-design learning. 22nd CIRP Design Conference on Sustainable Product Development, Bangalore, India, April 28-30.

BRULLET S., REYES T., **VALLET F.**, DUCELLIER G., REMY S., GOMES S. (2011). A product and system based approach for urban spaces eco-design. IET International Conference on Smart and Sustainable City, ICSSC 2011, Shanghai, China, July 6-8.

TYL B, LEGARDEUR J., MILLET D., **VALLET F.** (2010). Stimulate creative ideas generation for eco-innovation: an experimentation to compare eco-design and creativity tools, IDMME Virtual Concept, Bordeaux, October 20-22.

MESSAASIA M., **VALLET F.** EYNARD B. (2010). Sustainability as Requirement in System Engineering Approach, APMS 2010, October 11-13.

VALLET F., MILLET D., EYNARD B. (2010). How ecodesign tools are really used-Requirements list for a context-related ecodesign tool. 20th CIRP Design Conference, Nantes, 19th-21st April.

VALLET F., MILLET D., EYNARD B. (2009). Investigating the use of eco-design guides: presentation of two case studies. ICED'09, International Conference on Engineering Design, Stanford, USA, August 24-27th.

Colloques et Conférences Nationaux avec actes

VALLET F., KENDIRA A., MILLET D., EYNARD B. (2011). Conception versus éco-conception, 12^{ème} Colloque National AIP PRIMECA, Le Mont Dore, 29 mars-1er avril.

VALLET F., MILLET D., EYNARD B. (2010). Mise en œuvre des outils d'éco-conception : quel bénéfice pour les concepteurs? Colloque national CONFERE 2010, Sousse, Tunisie, 1er-2 juillet.

VALLET F., EYNARD B., MILLET D. (2009). Eléments de réflexion pour une évolution des outils d'éco-conception, 11^{ème} Colloque National AIP PRIMECA, La Plagne, 22-24 avril.

ALBERTI P., **VALLET F.** (2009). De la carte mentale à la créativité de produits : des exemples industriels internationaux. CPI'09, 6ème Conférence Internationale Conception et Production Intégrées, Fès, Maroc, 19-21 octobre.

Chapitres d'ouvrage

VALLET F., MILLET D., EYNARD B. (2011). Requirements and Features Clarifying for eco-design tools, In *Global Product Development*, A. Bernard Ed. pp 127-137. Nantes: Springer. ISBN-10: 3642159729.

VALLET F., MESSAADIA M., EYNARD B. (2010). Sustainability Requirements Deployment in Product-Process Eco-design, In *Towards Sustainable Manufacturing*, Vigtil A., Rolstadas B., Moseng B., pp. 143-158. Trondheim : IMS and Tapir Academic Press. ISBN 978-82-519-2706-2.

Revues

MESSAASIA M., **VALLET F.**, EYNARD B. (2011) A Systems Engineering Framework based on Eco-Design, *INCOSE Insight* 14(4), pp. 34-35.

VALLET F., MILLET D., EYNARD B., GLATARD-MAHUT S., TYL B. BERTOUCI G., Using eco-design tools: an overview of experts' practice. *Design Studies* (2012) <http://dx.doi.org/10.1016/j.destud.2012.10.001>.

ANNEXES

ANNEXE 1 : DESCRIPTION DE GUIDES D'ECO-CONCEPTION

ANNEXE 2 : SYNTHESE DES APPROCHES EXPERIMENTALES EN ECO-CONCEPTION

ANNEXE 3: CARACTERISATION D'UNE SELECTION D'OUTILS D'ECO-CONCEPTION

ANNEXE 4: TRANSCRIPTION ET CODAGE DE LA SESSION « ECODESIGN PILOT »

ANNEXE 5: SCHEMA DE CODAGE DU CAS « BARBARAZ »

ANNEXE 6 : EVALUATION FINALE DES CONCEPTS « BARBARAZ »

ANNEXE 7: FEUILLES-REponses DU CAS « ASPI »

ANNEXE 8 : EXTRAITS DU QUESTIONNAIRE DE VALIDATION

ANNEXE 1 : DESCRIPTION DE GUIDES D'ECO-CONCEPTION

L'un des premiers guides de référence en éco-conception, «**PROMISE**», a été formalisé par **(Brezet & Van Hemel, 1997)**. Il se compose de deux types de ressources complémentaires: des fiches détaillées sur les 7 étapes de déploiement de la démarche en entreprise; neuf «modules» éclairant des points particuliers à l'aide d'illustrations et de cas pratiques (par méthodes de Life Cycle Costing, d'ACV, réalisation d'ateliers d'éco-conception). Ce guide évolue en 2009 sous la forme d'un manuel «D4S» dédié au Sustainable Design. Il comprend deux volets distincts: l'un consacré à une approche plutôt incrémentale de «redesign» et l'autre à des approches radicales d'éco-innovation.

L'étude de l'outil **Information/Inspiration** a été initiée par une collaboration entre l'Université de Loughborough (UK) et la société Electrolux entre 1998 et 2001. La constatation de départ a été que les outils d'éco-conception disponibles alors étaient inadaptés à la pratique des designers industriels pour deux raisons principales. La première est liée au temps de mise en œuvre des outils, de recherche d'informations et au caractère trop général des préconisations. La seconde réside dans le manque de prise en compte de la culture propre du designer industriel, fondée en grande partie sur des études de cas et des exemples. La synthèse de l'étude menée par Lofthouse aboutit au prototype Information/Inspiration, qui combine avantageusement informations traditionnelles en éco-conception et exemples de produits et services éco-conçus **(Lofthouse, 2001 ; 2006)**. L'outil est structuré en deux blocs parallèles accessibles à partir du menu d'accueil. Chaque bloc, «Information» ou «Inspiration», peut déployer jusqu'à trois niveaux d'informations et présente la particularité d'inclure des liens entre les blocs. La logique purement chronologique n'a pas été privilégiée ici, car les designers industriels apparaissent attachés à une grande liberté de navigation.

Le guide **OKALA (White et al., 2007)** s'adresse en priorité à des concepteurs professionnels ou étudiants qui débutent en éco-conception. «Okala» signifie «life sustaining energy» en langage indigène amérindien Hopi. Le point fort de la dernière version du guide Okala est de

caractériser les valeurs d'émissions de CO2 pour 240 matériaux et procédés et de proposer des pistes de réflexions pour l'éco-conception de produits inspirés de la bionique.

Au plan national, **ECOFAIRE** est un programme qui s'est déroulé de 2006 à 2008, organisé et piloté par la SEM Pays de Loire en collaboration avec le cabinet conseil EVEA⁶. Ce programme est destiné aux PME et PMI des pays de Loire, avec l'objectif de « *favoriser et faciliter le développement de produits plus respectueux de l'environnement* ». A cet effet, l'étude collaborative a été menée avec des entreprises, des designers, des concepteurs, des consultants, des représentants de bureaux d'études et de lycées. L'outil méthodologique ECOFAIRE est l'un des éléments de synthèse de ce travail. Il propose deux fiches introductives, et dix-huit fiches-outils à aborder lors des cinq étapes chronologiques suivantes: Cadrage et enjeux du projet, Evaluation environnementale initiale, Recherche de solutions, Evaluation des solutions, Bilan et Communication. De plus, des fiches de bilan par étape, dites «fiches-étapes» sont disponibles. Notons que l'outil est conçu pour des utilisateurs non-experts en éco-conception, qu'ils appartiennent à l'entreprise (concepteur, designer, membre du bureau d'études, de la R&D, du marketing) ou au monde académique (enseignants, étudiants).

⁶ Voir www.evea-conseil.fr.

ANNEXE 2 : SYNTHÈSE DES APPROCHES EXPERIMENTALES EN ECO-CONCEPTION

Référence	Position		Environnement		Collecte de données		Codage		Expertise		Participants		
	Qualitative	Quantitative	In vivo	In vitro	Temps réel	Différée	Oui	Non	Etudiants	Professionnels	Concepteur	Equipe de conception	Organisation
(Bakker, 1995)	X	X		X	THA	DOC	X			X	X		
(Sherwin, 2000)	X		X		POB	INT DOC	X			X	X		
(Ritzen, 2001)	X		X			INT	X			X			X
(Jones et al., 2001)	X	X		X		DOC		X	X			X	
(Lindhal, 2006)	X		X			INT	X			X			X
(Akermark, 2005)	X		X			INT		X		X			X
(Le Pochat, 2005)	X		X			DOC		X		X			X
(Reyes, 2007) (Enquêtes 1 et 2)		X	X			QUE		X		X			X
(Lilley, 2007) (Main Study)	X		X			DOC QUE		X	X		X		
(Tyl et al., 2010)	X	X		X	POB	DOC QUE		X		X		X	
(Vallet, Millet & Eynard., 2010)	X	X		X	POB	DOC QUE		X		X		X	
(Collado & Ostad-Ahmad-Ghorabi, 2010)		X		X		DOC		X	X		X		
(Sakao, Paulsson & Mizuyama, 2011)		X		X	POB	DOC	X		X			X	

POB Observation Participative; THA Think aloud ; DOC Documents ; INT Interview ; QUE Questionnaire

ANNEXE 3: CARACTERISATION D'UNE SELECTION D'OUTILS D'ECO-CONCEPTION (2/3)

Type d'outil	Nom outil	Référence	Référentiel: dimensions et niveaux couverts par les outils																							
			Cycle de vie	Critères	PP Indus.			PP Civiles		Remise en cause			Processus													
			Cycle partiel	Cycle complet	Cycles multiples	Critères techniques (Mono/Multi)	Critères environnementaux (Mono/Multi)	Critères Développement Durable	Expert(s) environnement	Equipe de conception & expert environnement	Entreprise étendue	Ecosystèmes d'entreprises	Consommateur final	Communautés	Oragnismes d'état	Amélioration	Reconception produit	Innovation Produit	Innovation Systèmes	Définition des objectifs	Diagnostic/Eval. Initiale & Hiérarchisation	Préconisations	Evaluation environnementale	Représentation	Communication	
Guides d'éco-conception	D4S Manual	Crul & Diehl 2009				MJ																				
	Eco Design Pilot	Wimmer et al. 2003				MJ																				
	ECOFAIRE	ECOFAIRE 2008				MJ																				
	Information Inspiration	Lofthouse 2001																								
	DTU Guide	Mc Aloone & Bey 2009				MJ																				
	PROMISE Guide	Brezet & Van Hemel 1997				MJ																				
Lignes directrices	Ten Golden Rules	Luttrupp & Lagerstedt 2006				MJ																				
	LiDS Wheel	Brezet & Van Hemel 1997				MJ																				
	EcoDesign Web	Lofthouse 2009																								
	Natural Step	Hallstedt 2008																								

ANNEXE 3: CARACTERISATION D'UNE SELECTION D'OUTILS D'ECO-CONCEPTION (3/3)

Type d'outil	Nom outil	Référence	Référentiel: dimensions et niveaux couverts par les outils																							
			Cycle de vie	Critères	PP Indus.	PP Civiles	Remise en cause	Processus																		
			Cycle partiel	Cycle complet	Cycles multiples	Critères techniques (Mono/Multi)	Critères environnementaux (Mono/Multi)	Critères Développement Durable	Expert(s) environnement	Equipe de conception & expert environnement	Entreprise étendue	Ecosystèmes d'entreprises	Consommateur final	Communautés	Organismes d'état	Amélioration	Reception produit	Innovation Produit	Innovation Systèmes	Définition des objectifs	Diagnostic/Eval. Initiale & Hiérarchisation	Préconisations	Evaluation environnementale	Représentation	Communication	
QFD/AMDEC et Analyse de la Valeur	Eco Functional Matrix	Lagerstedt 2003																								
	Eco Value Analysis	Oberender & Birkhofer 2004				Mo																				
	Environmental Effect Analysis	Lindhal 2001																								
	QFDE	Masui et al. 2001																								
Créativité	Eco ASIT	Tyl et al. 2010																								
	9 Screens	O'Hare 2010																								
	Product Idea Tree	Jones et al. 2001																								

Type d'outil	Nom outil	Référence	Référentiel: dimensions et niveaux couverts par les outils																						
			Cycle de vie	Critères	PP Indus.			PP Civiles			Remise en cause			Processus											
			Cycle partiel	Cycle complet	Cycles multiples	Critères techniques (Mono/Multi)	Critères environnementaux (Mono/Multi)	Critères Développement Durable	Expert(s) environnement	Equipe de conception & expert environnement	Entreprise étendue	Ecosystèmes d'entreprises	Consommateur final	Communautés	Oragnismes d'état	Amélioration	Reconception produit	Innovation Produit	Innovation Systèmes	Définition des objectifs	Diagnostic/Eval. Initiale & Hiérarchisation	Préconisations	Evaluation environnementale	Représentation	Communication
QFD/AMDEC et Analyse de la Valeur	Eco Functional Matrix	Lagerstedt 2003																							
	Eco Value Analysis	Oberender & Birkhofer 2004				Mo																			
	Environmental Effect Analysis	Lindhal 2001																							
	QFDE	Masui et al. 2001																							

Type d'outil	Nom outil	Référence	Référentiel: dimensions et niveaux couverts par les outils																							
			Cycle de vie	Critères	PP Indus.			PP Civiles			Remise en cause			Processus												
			Cycle partiel	Cycle complet	Cycles multiples	Critères techniques (Mono/Multi)	Critères environnementaux (Mono/Multi)	Critères Développement Durable	Expert(s) environnement	Equipe de conception & expert environnement	Entreprise étendue	Ecosystèmes d'entreprises	Consommateur final	Communautés	Oragnismes d'état	Amélioration	Reconception produit	Innovation Produit	Innovation Systèmes	Définition des objectifs	Diagnostic/Eval. Initiale & Hiérarchisation	Préconisations	Evaluation environnementale	Représentation	Communication	
Créativité	Eco ASIT	Tyl et al. 2010																								
	9 Screens	O'Hare 2010																								
	Product Idea Tree	Jones et al. 2001																								

ANNEXE 4: TRANSCRIPTION ET CODAGE DE LA SESSION « ECODESIGN PILOT-(EXTRAIT LIGNES 1-57 ; CODAGE DE NIVEAU 1 ET 2)

N° ligne	Temps	Participant	Outil	Codage		Texte transcrit
				1er niveau	2è niveau	
1	3'35	AN		P	P	Rappel des objectifs : mettre en œuvre cette méthode avec des idées que l'on a par ailleurs.
2				P	P	EDPilot, tout le monde connaît. C'est un outil, un petit système expert en fait. /./ (Discussions, inaudible)
3				P	O	(Au modérateur) On est en train de déposer les brevets, on vous prévient.
4				P	P	Donc une sorte de système expert en fait, qui assiste à la recherche de bonnes solutions.
5		F		C	EI	Où sont les impacts prépondérants enfin -
6		AN		P	P	Est-ce que c'est un type AB, C, D, E. Sachant que c'est pas si exclusif.
7		J		P	P	On a des rubriques qui reviennent.
8	5'	AN		P	P	On y va, on met en œuvre. (Lit).
9				P	P	Type A: intensif en impact Matières Premières; Type B: en impact production, type C: impact transport; Type D: Utilisation..
10				P	P	Ouais qu'est-ce que tu suggères ?
11		F		C	EI	On pensait A ou B.
12		J		C	EI	J'y connais rien mais j'imagine que c'est plus sur le procédé de formage.
13		J		C	EI	A ou B, je pensais que c'était à cheval.
14		J		C	EI	La matière première c'est ouais -
15		AN		C	St	Moi je pense que l'impact « Utilisation » est faible.
16		J		C	EI	Après il y a les impacts connexes.
17		AN		C	O	Tu penses à quoi ? ()
18		AN		P	P	On pourrait peut-être faire avant ça le cycle de vie et imaginer les impacts, non ?
19		J		C	O	Oui allons-y.
20	6'	AN		C	EI	Cycle de vie. On peut faire comme ça, on va gagner du temps (Déchire une feuille de paperboard). ++
21		AN		C	EI	Extraction +++ (Bruit de fond)
22		AN		C	EI	Impacts liés à l'extraction ?
23		F		C	G	Déjà qu'est-ce qu'on prend comme produit ? Que le rasoir, les consommables associés ?
24		AN		C	G	Rasoir, plus consommables, plus emballage.
25		F		C	G	Plus l'emballage -
26	7'			C	EI	Je sais pas. C'est un sachet plastique ?
27		AN		C	EI	Un blister c'est la coque thermoformée PVC transparent.
28		AN		?		Il y a marqué sachet ?
29		X		C	EI	C'est pour l'autre. L'un c'est un blister l'autre un sachet.
30		AN		C	EI	Emballage.
31				C	G	On prend les consommables je pense que c'est important.
32		F		C	G	Donc l'eau avec de la mousse-
33		AN		C	G	Eau plus mousse. Est-ce que l'anti-coupeure on le prend en compte ?
34		J		C	G	L'after-shave. (Rires)
35		AN		C	EI	L'after-shave on peut dire que c'est commun à tous les rasoirs.
36				C	EI	Mais le truc anti-coupeures si tu as un mauvais rasoir. Tu le vois là, tiens. C'est l'espèce de truc, la barre -
37	8'	J		C	G	Mais ça c'est dans le produit ?
38		AN		C	EI	Oui mais même avec ça on va se couper.
39		J		C	EI	C'est quoi l'avantage -
40		AN		C	EI	() en pierre (Brouhaha). Avant ou après.
41		J		C	EI	Oui pour soigner la coupure.
42		AN		C	D	On met de côté. (Rires)
43				C	EI	Surtout si t'es super pressé. Tu te lèves à 8h30, 8h45 et forcément tu te coupes et ça n'arrête pas.
44	9'			C	EI	Et avec ça tu mets ça () un truc. Il y a ça au Maroc, des pierres, tu passes sous l'eau, hop, c'est naturel.
45				C	O	Bon bref, OK, rien d'autre ?
46		J		C	EI	Par contre ce qu'il faut définir c'est comme tu dis, une unité. Quelle est la quantité -
47		J		C	EI	C'est important pour la phase d'utilisation, ça va définir.
48		F		C	EI	Oui le nombre d'utilisations de ton rasoir.
49		J		C	EI	Combien de fois on utilise le rasoir ?
50		A		C	G	C'est jetable je veux dire. (Brouhaha)
51		A		C	G	Moi, normalement, j'aurais dit homme-femme.
52		AN		C	EI	Nous on s'en sert tous les jours. Vous? Vous ne vous en servez pas tous les jours.
53	10'	F		C	EI	Moi pas.
54		A		C	O	Vous d'une façon générale.
55		AN		C	EI	Donc femme et homme. Nous c'est forcément journalier.
56				C	EI	Et puis femme, une fois par semaine.
57				C	EI	On va dire que ce serait à définir par une enquête.

[...]

ANNEXE 5: SCHEMA DE CODAGE DU CAS « BARBARAZ »

Définition des codes de la catégorie « Contenu »

Etapes	Code	Descriptif	Exemples
Goal clarification	G	Définition du contexte Choix du produit Niveau d'innovation Labels, réglementations actuels	« On choisit le rasoir homme » « C'est un nouveau produit ou une innovation mineure? » « REACH va passer par là ».
Evaluation initiale	EI	Evaluation environnementale et fonctionnelle initiale du produit existant	
	CD	Conditions de rasage : nombre de passages, superficie de rasage, fréquence, sécurité, prise en main...	« C'est à dire que 7 visages correspondent à 2 jambes en surface » « On peut passer 1 fois, 2 fois pour se raser »
	UF	Unité Fonctionnelle, fonction, périmètre d'étude	« Qu'est ce qu'on prend comme produit? Que le rasoir, les consommables associés ? » « Sur l'usage déjà qu'on a du mal à définir le périmètre alors si tu rajoutes la logistique. »
	CO	Consommations (eau, consommable, emballage), déchets	« Trois bombes par an, adjugé » « Ce qui est super important c'est que l'eau tiède, 40°C, ça fait beaucoup d'énergie. A mon avis l'impact c'est pas mal au "On dit 2g de carton pour vous, 3g de sachet pour nous." »
	M	Matières Premières	« Celui là c'est peut être pas du PS, peut être un polypro potentiellement »
	FA	Fabrication	« En étape préalable, tu dois avoir du laminage »
Stratégie	St	Proposition concernant les stratégies et priorités d'amélioration environnementales	« Je vois sur le papier ici « Fabriqué aux USA, conditionné en Europe ». Peut-être en bateau. Les distances paraissent énormes, mais avec le bateau - »
			« Et pour le métal, y-a-t'il une récupération en circuit fermé ? »
Génération de solutions	So	Proposition concernant les solutions et idées Recherche par analogie	« Augmenter la durabilité à tout prix » « Réduire la consommation d'eau » « Sur le cycle : transport et packaging sont négligeables »
			« Tu peux imaginer une pompe, une seringue » « C'est comme l'épandage. Juste ce qu'il faut pour couper »

Analyse et évaluation solutions	ES	Questions/réponses concernant l'espace des solutions Exploration de l'espace, Recherche de conditions de validité Evaluation des solutions (environnementale, fonctionnelle) qualitative ou quantitative.	« Mais du coup le rasoir ça pourrait aussi être le protège-lame » « Si on élargit la lame, on a moins de passage, mais va-t-on partout ? » « Peut-être qu'en eau, on est au même point. Par contre en terme de déchets- » « Le risque c'est que l'acheteur dise on n'en veut pas »
Décision	D	Décision contre ou en faveur d'une idée	« On va dire le changement de plaque lubrifiante, ça je peux l'enlever parce que c'est ridicule »
Contrôle	C	Réflexivité sur une solution	« Pas bête »
Autre	O	Acquiescement Digression sur un autre sujet	« Oui », « Non », « OK » « C'est comme avec mes étudiants ... »

Définition des codes de la catégorie « Processus »

Etapes	Code	Descriptif	Exemples
Planning	P	Proposition concernant le fonctionnement de groupe, lecture de paragraphes de l'outil	« Faut qu'on aie des idées » "Il serait intéressant de les représenter, ces idées. Je crains que celui qui va traiter nos fiches -Fais un croquis rapide sur le paperboard." « On peut utiliser « Roue d'éco-conception R1 » et « Check-liste R2 »
Analyse	A	Questions/réponses concernant le processus, l'outil	« Est-ce que ça veut dire que c'est pas encore fait, si on dit "réalisation non ?" »
Evaluation	E	Evaluation du processus : Négative Positive Critique du design brief proposé Gestion du temps	« Il ne faut pas partir dans tous les sens » « Ca, on sait » « On a bien répondu en fait » « C'est une étude de 10 mois en fait » « On est en retard? »
Décision	D	Décision concernant le processus	« Donc on va faire sans [SIMAPRO] »
Contrôle	C	Résumé, reformulation, prise de recul concernant le travail du groupe Prise de note du travail collectif	« Je récapitule » « Je vous rappelle les leviers »
Autre	O	Relations sociales, blagues Demande de répéter	« Attention à ce que tu vas dire » « Tu dis ? » « Tu montres ? »

ANNEXE 6 : EVALUATION FINALE DES CONCEPTS « BARBARAZ »

SCE : SOMME DES CARRES DES ECARTS

		NOTES EVALUATEURS													SCE
	Moyenne	GB	CL	TR	BL	SM	BT	YL	NT	DM	AE	JB	VB	HA	
	SIMAPRO		0				0	0	0	0	0	0			
N°	ORIGINALITE														
1	Q02_Manche court	3,50	4	3	4	2	3	4	4	4	3	4			4,50
2	Q04_Manche bambou	2,70	3	3	3	2	3	2	3	1	4	3			6,10
3	Q06_3 lames de rechange	2,60	2	3	3	2	4	2	2	2	3	3			4,40
4	Q08_Lames affutables	2,90	2	3	5	2	4	3	2	2	3	3			8,90
5	Q10_Lames à deux faces coupantes	2,80	2	3	3	2	3	3	2	3	4	3			3,60
6	Q12_Lame large et souple	3,50	4	3	3	5	4	2	2	4	4	4			8,50
7	Q14_Applicateur mousse intégré	3,10	3	3	4	2	4	2	2	4	4	3			6,90
8	Q16_Mousse solide	3,00	4	3	3	2	4	2	2	4	3	3			6,00
9	Q18_Racleur intégré au manche	3,10	3	2	3	2	4	3	4	3	3	4			4,90
	Moyenne		3,00	2,89	3,44	2,33	3,67	2,56	2,56	3,00	3,44	3,33			
	SCE		6,00	0,89	4,22	8,00	2,00	4,22	6,22	10,00	2,22	2,00			

		NOTES EVALUATEURS													SCE
	Moyenne	GB	CL	TR	BL	SM	BT	YL	NT	DM	AE	JB	VB	HA	
N°	PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE														
1	Q03_Manche court	2,90	3	2	3	2	3	3	3	3	3	4			2,90
2	Q05_Manche bambou	3,30	4	2	4	2	4	2	4	3	4	4			8,10
3	Q07_3 lames de rechange	2,70	3	3	3	2	3	2	3	3	2	3			2,10
4	Q09_Lames affutables	2,80	3	2	2	4	3	2	3	3	3	3			3,60
5	Q11_Lames à deux faces coupantes	2,60	3	2	2	4	3	2	2	3	2	3			4,40
6	Q13_Lame large et souple	3,40	2	2	4	5	4	2	3	4	4	4			10,40
7	Q15_Applicateur mousse intégré	3,00	4	3	3	2	3	2	3	4	2	4			6,00
8	Q17_Mousse solide	3,00	4	2	3	1	4	2	3	4	4	3			10,00
9	Q19_Racleur intégré au manche	2,90	3	2	3	2	3	2	4	3	3	4			4,90
	Moyenne		3,22	2,22	3,00	2,67	3,33	2,11	3,11	3,33	3,00	3,56			
	SCE		3,56	1,56	4,00	14,00	2,00	0,89	2,89	2,00	6,00	2,22			

		NOTES EVALUATEURS													SCE
	Moyenne	GB	CL	TR	BL	SM	BT	YL	NT	DM	AE	JB	VB	HA	
	ECOFAIRE														
N°	ORIGINALITE														
1	Manche monomatériau recyclable (Innovation	3,91	4	4	4	3	3	4	4	4	5	3	5	4,91	
2	Tête et manche séparables (I)	3,91	3	5	4	3	2	4	4	4	5	4	5	8,91	
3	Manche multi-usages (I)	2,36	2	2	3	2	1	2	2	2	4	3	3	6,55	
4	Marquage/sensibilisation usager (I)	3,82	4	4	4	4	3	4	5	3	4	3	4	3,64	
5	Matériau biodégradable (I)	3,55	2	2	4	4	3	4	4	4	4	4	4	6,73	
6	Pigments végétaux (I)	3,00	3	3	4	3	2	3	4	3	3	2	3	4,00	
7	Elimination poils coupés (I)	3,82	4	3	3	4	5	3	4	4	5	3	4	5,64	
8	Information usagers (I)	4,27	4	4	5	4	4	4	5	4	5	4	4	2,18	
	Moyenne		3,25	3,38	3,88	3,38	2,88	3,50	4,00	3,50	4,38	3,25	4,00		
	SCE		5,50	7,88	2,88	3,88	10,88	4,00	6,00	4,00	3,88	3,50	4,00		
N°	PERF. ENVIRONNEMENTALE														
1	Manche monomatériau recyclable (Perf. Env.	2,91	2	3	4	4	3	3	3	3	2	2	3	4,91	
2	Tête et manche séparables (PE)	3,18	3	4	3	2	4	3	3	4	3	3	3	3,64	
3	Manche multi-usages (PE)	3,00	3	4	3	2	2	3	3	3	3	4	3	4,00	
4	Marquage/sensibilisation usager (PE)	2,82	2	3	3	2	1	2	3	4	4	4	3	9,64	
5	Matériau biodégradable (PE)	3,45	3	4	3	5	2	3	4	2	4	4	4	8,73	
6	Pigments végétaux (PE)	3,27	2	3	3	4	2	4	4	4	3	2	5	10,18	
7	Elimination poils coupés (PE)	3,45	3	2	3	3	3	3	4	4	5	4	4	6,73	
8	Information usagers (PE)	2,91	4	1	4	2	1	2	3	5	3	3	4	16,91	
	Moyenne		2,75	3,00	3,25	3,00	2,25	2,88	3,38	3,63	3,38	3,25	3,63		
	SCE		3,50	8,00	1,50	10,00	7,50	2,88	1,88	5,88	5,88	5,50	3,88		

		NOTES EVALUATEURS														
		Moyenne	GB	CL	TR	BL	SM	BT	YL	NT	DM	AE	JB	VB	HA	SCE
ECODESIGN PILOT																
N°	ORIGINALITE															
1	Q02_Rasoir avec buse	2,67		4	3	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	4,67
2	Q04_Nettoyage par pression manuelle	2,42		3	1	3	2	2	2	3	3	4	2	2	2	6,92
3	Q06_Poussoir (évacuation poils)	3,50		4	3	3	5	2	3	5	4	3	5	3	2	13,00
4	Q08_Nettoyage jet d'eau (robinet)	2,42		3	2	3	3	2	3	2	2	2	2	2	3	2,92
		Moyenne		3,50	2,25	3,00	3,00	2,25	2,50	3,25	2,75	3,00	2,75	2,50	2,25	
		SCE		1,00	2,75	0,00	6,00	0,75	1,00	4,75	2,75	2,00	6,75	1,00	0,75	
PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE																
N°																
1	Q03_Rasoir avec buse	2,67		3	2	4	2	3	2	4	2	2	3	3	2	6,67
2	Q05_Nettoyage par pression manuelle	2,67		3	2	4	3	3	1	4	3	2	2	2	3	8,67
3	Q07_Poussoir (évacuation poils)	3,08		3	2	5	3	3	2	4	4	3	4	2	2	10,92
4	Q09_Nettoyage jet d'eau (robinet)	3,00		4	2	5	3	2	3	4	3	2	2	2	4	12,00
		Moyenne		3,25	2	4,5	2,75	2,75	2	4	3	2,25	2,75	2,25	2,75	
		SCE		0,75	0	1	0,75	0,75	2	0	2	0,75	2,75	0,75	2,75	

ANNEXE 7: FEUILLES-REPONSES DU CAS « ASPI », GROUPE CYCLE DE VIE

ECO-DESIGN BRIEF (5 minutes)
« **DESIGN THE NEXT GENERATION VACUUM CLEANER!** »

You have just been hired as employees in eco-design in a company whose leadership in the domain of **domestic appliances** is acknowledged in Europe.

The management board of the company expresses the will to **reduce environmental impacts and also create environmental value** for its range of **vacuum cleaners**.

You are asked to:

- **frame the environmental problem** of dust suction,
- **build the environmental strategy** of the company,
- **find solutions of improvement/innovation**. These might be existing solutions or completely new solutions.
- **evaluate (qualitatively) the different solutions**.

Gr...

LET'S WARM UP! (10 minutes)

Propose a **name** for your product, and write down its **slogan**.

Gr...

R1 LIFE CYCLE & ENVIRONMENTAL STRATEGY (35 minutes)
Map the product **life cycle** with associated flows. Indicate the most impacting steps for a vacuum cleaner. Give a possible **Functional Unit**.

Gr...

R2 INITIAL ENVIRONMENTAL ASSESSMENT (30 minutes)
Fill this MET matrix (qualitatively and/or quantitatively)

	Extraction	Production	Distribution	Use	End of Life
Material					
Energy					
Toxicity					
Other					

Gr...

R3 IDEA GENERATION & FIRST ASSESSMENT (25 minutes)
Propose several ideas of improvement or innovation (words/sketches) and map their position on the following grid.

Gr...

R4 IDEA GENERATION & FIRST ASSESSMENT (15 minutes)
Develop one or two concepts with sketches and indicate the integrated ideas of improvement/innovation.

CONCEPT 1 **CONCEPT 2**

Gr...

ANNEXE 8 : EXTRAITS DU QUESTIONNAIRE DE VALIDATION

QUESTIONS OUVERTES

Présentation de l'objectif du questionnaire

L'objectif de ce questionnaire est de cartographier la manière dont les **enseignements d'éco-conception** sont actuellement construits. Pour cela nous proposons de considérer plusieurs dimensions privilégiées, sur lesquelles nous attendons vos commentaires éclairés. Chaque dimension est présentée sur la feuille "Annexe" (voir liens). Le questionnaire comporte 28 questions. *Merci par avance de votre aide à faire avancer la recherche en éco-conception !*

Pour mieux vous connaître...

Prénom et Nom	
Etablissement	
Fonction	

Quel est le niveau de la (des) formation(s) à l'éco-conception dispensée(s) dans l'établissement?
Quel est le profil des étudiants auxquels se destine la (les) formation(s)?
Depuis combien de temps la (les) formation(s) existe(nt)-t-elle(s)?
Quel est le nombre d'heures total consacré à la formation à l'éco-conception ?
Quelle est l'offre de formation? Comment a-t-elle été construite? Suivant quels axes ?
Quels sont les outils manipulés par les étudiants? Pourquoi ce choix?
Quels sont les outils développés dans votre équipe de recherche? Quels en sont les objectifs?
Quelle est la structure de chaque module de cours?
Quelles sont les articulations, la progression envisagée?
Quels sont les éléments de connaissances/pratiques à acquérir?

EXTRAITS DES QUESTIONS FERMEES 1 à 28 (1/2)

		DIMENSION 1: CRITERES																	
1		Quelle est la nature des critères d'évaluation environnementale abordés au cours de la formation?	<table border="1"> <tr> <td rowspan="2">Critères techniques</td> <td>Monocritère</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Multicritère</td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Critères environnementaux</td> <td>Monocritère</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Multicritère</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Critères Développement Durable</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Autre</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	Critères techniques	Monocritère		Multicritère		Critères environnementaux	Monocritère		Multicritère		Critères Développement Durable			Autre		
Critères techniques	Monocritère																		
	Multicritère																		
Critères environnementaux	Monocritère																		
	Multicritère																		
Critères Développement Durable																			
Autre																			
2		Quels sont les OUTILS d'évaluation environnementale utilisés au cours de la formation?																	
3		Combien y a-t-il d'INTERVENANTS sur la notion de critères d'éco-conception et quel est leur profil ?																	
4		Quelles sont les COMPETENCES attendues des étudiants en fin de formation sur la notion de critères d'éco-conception?																	

		DIMENSION 5: PARTIES PRENANTES INDUSTRIELLES											
17		De quelles parties prenantes de la sphère industrielle les points de vue sont-ils abordés au cours de la formation?	<table border="1"> <tr> <td>Expert(s) environnement</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Equipe de conception et expert(s) environnement</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Entreprise étendue</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ecosystème industriel</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Autre</td> <td></td> </tr> </table>	Expert(s) environnement		Equipe de conception et expert(s) environnement		Entreprise étendue		Ecosystème industriel		Autre	
Expert(s) environnement													
Equipe de conception et expert(s) environnement													
Entreprise étendue													
Ecosystème industriel													
Autre													
18		Quels sont les OUTILS utilisés pour traiter du niveau de remise en cause des produits?											
19		Combien y a-t-il d'INTERVENANTS sur le niveau de remise en cause des produits et systèmes et quel est leur profil ?											
20		Quelles sont les COMPETENCES attendues des étudiants en fin de formation sur le niveau de remise en cause des produits et systèmes?											

EXTRAITS DES QUESTIONS FERMEES 1 à 28 (2/2)

25	<p>REFERENTIEL COMPLET</p> <p>Pensez-vous que le REFERENTIEL COMPLET (formé des dimensions 1 à 6) soit adapté à la description des divers aspects de la formation à l'éco-conception ?</p>	<table border="1"> <tr><td>Pas du tout adapté</td><td></td></tr> <tr><td>Peu adapté</td><td></td></tr> <tr><td>Bien adapté</td><td></td></tr> <tr><td>Très bien adapté</td><td></td></tr> <tr><td>Sans opinion</td><td></td></tr> </table>	Pas du tout adapté		Peu adapté		Bien adapté		Très bien adapté		Sans opinion			
Pas du tout adapté														
Peu adapté														
Bien adapté														
Très bien adapté														
Sans opinion														
26	<p>Si non, pour quelles raisons ? <i>Par exemple dimensions manquantes ou inutiles, dimensions trop nombreuses, formulation imprécise...</i></p>	<p>Commentaires:</p>												
27	<p>Peut-on, d'après vous, se passer de certaines dimensions?</p>	<table border="1"> <tr><td>OUI</td><td></td></tr> <tr><td>NON</td><td></td></tr> <tr><td>Sans opinion</td><td></td></tr> </table>	OUI		NON		Sans opinion							
OUI														
NON														
Sans opinion														
28	<p>Si oui, laquelle (ou lesquelles) seriez-vous prêt(e) à retirer ?</p>	<table border="1"> <tr><td>Critères</td><td></td></tr> <tr><td>Cycles de vie</td><td></td></tr> <tr><td>Processus</td><td></td></tr> <tr><td>Remise en cause</td><td></td></tr> <tr><td>Parties prenantes industrielles</td><td></td></tr> <tr><td>Parties prenantes civiles</td><td></td></tr> </table>	Critères		Cycles de vie		Processus		Remise en cause		Parties prenantes industrielles		Parties prenantes civiles	
Critères														
Cycles de vie														
Processus														
Remise en cause														
Parties prenantes industrielles														
Parties prenantes civiles														
<p>...MERCI DE VOTRE PARTICIPATION !</p>														